Mantenimiento Industrial Efectivo

Alberto Mora Gutiérrez

Editorial

CD con ejemplos y programas informáticos

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Mantenimiento Industrial Efectivo

Alberto Mora G.

Libro ofrecido a mi Esposa Martha Cecilia y a mis Hijos Felipe, Jennifer y Valery; por su permanente apoyo durante la concepción y realización de este proyecto

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Mantenimiento Industrial Efectivo

Autor © Alberto Mora Gutiérrez ®

2012

Reserva de derechos de autor ®

©Primera edición julio de 2009 en Medellín Colombia

©Segunda edición junio de 2012 en Medellín Colombia

Prohibida su reproducción parcial o total©
a menos que se tenga autorización escrita previa del
Autor con firma autenticada legalmente

Editado por *en Carrera 26 D # 28 sur 15 Envigado Antioquia Colombia*

ISBN 978-958-98902-0-2

Contiene CD con Figuras, Ilustraciones, Ejemplos, Ejercicios, Programas Informáticos, Lecturas y Material de apoyo diverso.

*Depósito Legal **43285** de junio 6 de 2009, de la Biblioteca Nacional de Colombia*

Impreso en Fuentes Litográficas Limitada, Carrera 42 B # 33 B Sur 75 - Teléfono 57 4 3793352 - Envigado Antioquia Colombia – Julio de 2012

Copyright ©2012®

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Contenido

Contenido 5
Ejemplos 10
Ejercicios a resolver 10
Material de apoyo en el CD 10
Ilustraciones 11
Ecuaciones 13
0 Prólogo 15
0.1 Estructura, novedades y concepción del libro 16
1 Introducción - Evolución de Mantenimiento y Producción 17
1.1 Objetivo de Capítulo 1 18
1.2 Introducción a Capítulo 1 18
1.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 1 – Introducción 18
1.3 Evolución del mantenimiento 18
1.3.1 Historia de hechos relevantes que inciden en el mantenimiento vigente 19
1.3.1.1 La ingeniería y las tareas de mantenimiento, O.I.T. 19
1.3.1.2 Historia sucinta de hechos de la ingeniería mecánica asociados a mantenimiento 20
1.3.1.2.1 Historia 20
1.3.1.2.2 Diferentes culturas 20
1.3.1.2.3 Renacimiento 22
1.3.1.2.4 Revolución Industrial 22
1.3.1.2.5 Motores y máquinas de vapor 23
1.3.1.2.6 Motor de Combustión interna 23
1.3.1.2.7 Aviación 24
1.3.1.2.8 Era espacial 25
1.3.1.2.9 Época actual 25
1.4 Enfoques recientes de mantenimiento y de producción 26
1.4.1 Enfoque hacia las acciones de mantenimiento, etapas I y II 26
1.4.2 Enfoque hacia la organización táctica de mantenimiento, etapa III 27
1.4.3 Enfoque integral logístico de creación de una estrategia de mantenimiento, etapa IV 28
1.4.4 Enfoque hacia las habilidades y competencias de mantenimiento, etapa V 29
1.4.5 Enfoque hacia la gestión de activos, etapa VI 29
1.4.5.1 Activos y Pasivos 30
1.4.5.2 De gestión de pasivos a gestión de activos 31
1.4.5.2.1 La Terotecnología 32
1.4.5.2.2 La evolución organizacional y estructural de mantenimiento. 35
1.4.5.2.3 Importancia económica y tecnológica de mantenimiento 37
1.4.5.3 Definiciones y significados. 40
1.4.5.3.1 Gestión y Mantenimiento 41
1.4.5.3.2 Función y Objetivo de mantenimiento 42
1.5 Resumen del Capítulo 1 – Introducción 43
1.6 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 1 44
2 Enfoque Sistémico e Integral – CMD 45
2.1 Objetivo de Capítulo 2 45
2.2 Introducción a Capítulo 2 46
2.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 2 – Enfoque Integral - CMD 46
2.3 Sistema kantiano de mantenimiento 46
2.3.1 Unidad de Producción 47
2.3.2 Unidad de Mantenimiento 48
2.3.3 Sistema Integral de Mantenimiento 49
2.3.3.1 Categorización del mantenimiento 51
2.3.3.2 Cuerpo y función de los equipos. Efectos del espacio y del tiempo 52
2.3.3.3 Niveles del mantenimiento 54
2.3.3.3.1 Nivel 1 - Instrumental (Funciones y Acciones) 54

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2.3.3.3.2 Nivel 2 - Operacional (Acciones mentales) 55
2.3.3.3.3 Nivel 3 - Táctico (Conjunto de Acciones Reales) 55
2.3.3.3.4 Nivel 4 - Estratégico (Conjunto de Funciones y Acciones mentales) 55
2.3.4 Estructura, relaciones y elementos 55
2.3.4.1 Relaciones 55
2.3.4.2 Interacción – CMD 58
2.3.4.3 Métodos de predicción CMD: 58
2.4 Disponibilidad 60
2.4.1 Modelo Universal para pronosticar CMD 63
2.4.1.1 Diferentes Disponibilidades, de mayor uso empresarial 67
2.4.1.1.1 Disponibilidad Genérica - D_G 68
2.4.1.1.2 Disponibilidad Inherente o Intrínseca - D_I 70
2.4.1.1.3 Disponibilidad Alcanzada - D_A 71
2.4.1.1.4 Disponibilidad Operacional - D_O 74
2.4.1.1.5 Disponibilidad Operacional Generalizada - D_{GO} 76
2.5 Confiabilidad – Mantenibilidad – CMD – Estimación de F (t_j) y M (t_j) 79
2.5.1 Confiabilidad - Fallas 79
2.5.1.1 Probabilidad 80
2.5.1.2 Desempeño satisfactorio 80
2.5.1.3 Período 80
2.5.1.4 Condiciones de operación 80
2.5.1.5 Curva de Confiabilidad 80
2.5.1.6 Ejemplo de cálculo y obtención de curva de confiabilidad 81
2.5.2 Mantenibilidad – Reparaciones 84
2.5.2.1 Curva de la bañera o de Davies 86
2.5.2.2 Curva de Mantenibilidad 88
2.5.3 Estimación de No Confiabilidad - F(t) y de Mantenibilidad - M(t) 91
2.5.3.1 Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad y de la mantenibilidad. 95
2.5.3.1.1 Método i-kaésimo o Estimador No Sesgado 95
2.5.3.1.2 Método de Rango de Medianas - Tabla 96
2.5.3.1.3 Método Benard de aproximación de Rango de Medianas 100
2.5.3.1.4 Método Kaplan-Meier o K-M 101
2.5.3.1.5 Estimación de no confiabilidad y mantenibilidad con datos censurados 104
2.5.3.2 Recomendaciones y mejores prácticas con los métodos de estimación de F(t) y M(t) 106
2.6 Resumen del Capítulo 2 – Parámetros y Distribuciones - CMD 109
2.7 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 3 109
3 Parámetros y Distribuciones – CMD 111
3.1 Objetivo de Capítulo 3 111
3.2 Introducción a Capítulo 3 111
3.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 3 – Parámetros y Distribuciones – CMD 111
3.3 Estimación de parámetros – Weibull – LogNormal y Normal 111
3.3.1 Método gráfico de papel de Weibull o Allen-Plait 112
3.3.2 Fundamentos de la distribución Weibull 112
3.3.2.1 Curvas características de Weibull 113
3.3.2.2 Lectura de los parámetros η y β en el papel de Weibull 116
3.4 Uso del método de regresión lineal con mínimos cuadrados para alinear la función de probabilidad de Fallas (de no confiabilidad) o de mantenibilidad, para obtener parámetro. 122
3.4.1 Criterios de calidad de la alineación 123
3.4.1.1 Ajuste 123
3.4.1.2 Error típico o Variación o Error Estándar del Estimado 123
3.4.1.3 Coeficiente de Determinación Muestral r^2 y Ajustado 124
3.4.1.4 Coeficiente de Correlación 124
3.5 Transformaciones en Weibull, LogNormal y Normal para obtener parámetros por regresión 125
3.5.1 Distribución de Weibull 125

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3.5.1.1 Parámetros de vida útil y de reparaciones en Weibull 126
3.5.2 Distribución Normal 130
3.5.2.1 Parámetros de vida útil y de reparaciones en Normal 131
3.5.3 Distribución LogNormal 134
3.5.3.1 Parámetros de vida útil y de reparaciones en LogNormal 135
3.5.4 Distribución Exponencial 140
3.5.5 Distribución Gamma 141
3.6 Método de Máxima Verosimilitud - MLE 148
3.7 Pruebas de Bondad de Ajuste – Goodness of Fit 152
3.7.1 Kolmogórov-Smirnov 152
3.7.2 Anderson-Darling 153
3.7.3 Ji^2 – Chi cuadrado 154
3.8 Estimaciones de sistemas o equipos en serie y paralelo 156
3.8.1 Estructura en Serie 156
3.8.2 Estructura en Paralelo o Redundante activa 157
3.8.3 Estructura en Stand-by 159
3.8.4 Estructura Mixta 159
3.9 Resumen del Capítulo 3 – Parámetros y Distribuciones - CMD 163
3.10 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 3 163
4 Aplicación CMD - Estrategias y Acciones 165
4.1 Objetivo de Capítulo 4 165
4.2 Introducción a Capítulo 4 165
4.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 4 – Aplicación CMD – Estrategias y Acciones 165
4.3 Desarrollo de ejercicio integral CMD 165
4.4 Comportamiento futuro - Nuevos cálculos 174
4.5 Estrategias y acciones derivadas del CMD - Análisis de confiabilidad – **β**eta 176
4.5.1 Análisis de la confiabilidad influenciada por reparaciones futuras estimadas de corto plazo 176
4.5.2 Análisis de la confiabilidad influenciada por los mantenimientos planeados futuros estimados de corto plazo 177
4.5.3 Análisis de la función de mantenibilidad influenciada por las reparaciones TTR estimadas en el corto plazo 180
4.5.4 Análisis de la mantenibilidad influenciada por las tareas proactivas planeadas estimadas en el corto plazo 181
4.5.5 Recomendaciones estratégicas de acciones y táctica para el ejercicio integral de A_O 182
4.6 Análisis histórico, presente y futuro cercano de parámetros del ejercicio integral 182
4.6.1 Estrategias y acciones futuras 182
4.6.2 Pronósticos de indicadores CMD de corto plazo 185
4.6.2.1 Pronósticos con Series Temporales 185
4.6.2.1.1 Clases de métodos futurísticos según el tiempo a evaluar 186
4.6.2.1.2 Modelos AR.I.MA. – Metodología Box - Jenkins 190
4.6.2.1.3 Características de los AR.I.MA. 190
4.6.2.1.4 Descripción de los modelos AR.I.MA. (Modernos) 190
4.6.2.1.4.1 Metodología Box – Jenkins 191
4.7 Diferentes niveles de cálculo para el CMD - Fases 195
4.7.1 Distribución Hastings de dos fases. 195
4.7.2 Distribución Hjorth de tres fases. 197
4.8 Resumen del Capítulo 4 – Aplicación CMD - Estrategias y Acciones 198
4.9 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 4 198
5 - Nivel Instrumental 201
5.1 Objetivo de Capítulo 5 201
5.2 Introducción a Capítulo 5 201
5.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 5 – Nivel Instrumental 201
5.3 Fundamentos del Nivel Instrumental 201

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

5.4 Instrumentos básicos - Factores productivos de mantenimiento- Nivel instrumental..... 203
5.4.1 Sistema de información..... 203
5.4.2 Recursos Humanos – Talento..... 204
5.4.3 Herramientas, Repuestos e Insumos..... 205
5.4.4 Capital de Trabajo - Espacio Físico – Tecnología – Maquinaria - Recursos Naturales - Poder de Negociación - Recursos Humanos Carga Laboral – Planeación..... 205
5.4.4.1 Mantenimiento: función de producción..... 206
5.4.4.2 Función macroeconómica de la producción..... 206
5.4.4.3 Cantidad de servicios (o de productos), Servicios Promedio y Productividad..... 206
5.4.4.4 ¿Cuál es la cantidad óptima a usar en un Factor Productivo?..... 208
5.4.4.5 Parámetros de manejo cuando se utiliza más de un Factor Productivo..... 208
5.4.4.6 Factores productivos modernos (para mantenimiento y producción)..... 210
5.4.4.7 Términos de medidas básicas del nivel instrumental de mantenimiento..... 211
5.5 Instrumentos avanzados genéricos de mantenimiento - Nivel Instrumental..... 213
5.5.1 TQC..... 217
5.5.2 TQM..... 217
5.5.3 5S..... 217
5.5.4 Mejoramiento continuo..... 220
5.5.5 Herramientas estadísticas..... 221
5.5.5.1 Diagnóstico, control y rediseño de procesos de mantenimiento y producción..... 222
5.5.5.2 Obtención y manejo de los datos..... 224
5.5.5.3 Análisis y diagramas de Pareto..... 224
5.5.6 Diagramas causa-efecto..... 226
5.5.6.1 Histogramas..... 226
5.5.6.2 Distribuciones..... 227
5.5.6.3 Diagramas de dispersión, correlación y regresión lineal..... 228
5.5.6.4 Gráficas de control..... 230
5.5.6.5 Tamaños muestrales de la población para medias – Números aleatorios..... 230
5.5.6.6 Otras herramientas estadísticas..... 233
5.6 Instrumentos avanzados específicos de mantenimiento - Nivel Instrumental..... 234
5.6.1 Análisis de Fallas - FMECA, RCFA y RPN..... 234
5.6.2 Metodología Análisis de Fallas..... 236
5.6.2.1 RCFA..... 241
5.6.2.2 Procedimiento FMECA – RPN..... 243
5.6.2.3 Valoración cualitativa del Riesgo..... 253
5.6.3 Gestión y manejo de inventarios, repuestos e insumos de mantenimiento..... 256
5.6.3.1 Clasificación ABC..... 257
5.6.3.2 Costos..... 257
5.6.3.2.1 Costos de pedir al proveedor o fabricar..... 258
5.6.3.2.2 Costos de sostener..... 258
5.6.3.2.3 Costos de agotar..... 258
5.6.3.3 Nivel de servicio..... 258
5.6.3.4 Denominación Push o Pull..... 263
5.6.3.4.1 Push..... 263
5.6.3.4.2 Pull..... 268
5.6.4 Subcontratación..... 276
5.6.5 Métodos de diagnóstico rápido y confiable en mantenimiento..... 279
5.6.5.1 Flash Audit..... 279
5.6.5.2 Método de diagnóstico Jerárquico Analítico de Componentes Principales - Eigen Vector..... 280
5.6.5.2.1 Desarrollo..... 281
5.7 Instrumentos avanzados específicos de orden técnico, en mantenimiento..... 284
5.7.1 Instrumentos avanzados técnicos específicos..... 285
5.7.1.1 Inspección visual, acústica y al tacto de componentes..... 285
5.7.1.2 Vigilancia de temperaturas..... 285
5.7.1.3 Control de la corrosión..... 285

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

5.7.1.4 Resistencia eléctrica ... 285
5.7.1.5 Lubricación, engrase y aceites ... 285
5.7.1.6 Monitoreo de causas y efectos eléctricos ... 286
5.7.1.7 Termografía infrarroja ... 286
5.7.1.8 Análisis de vibraciones ... 286
5.7.1.9 Ferrografía - Análisis de lubricantes - Análisis espectrométrico – Cromatografía ... 287
5.7.1.10 Líquidos penetrantes ... 287
5.7.1.11 Ensayo de pulverizado de partículas magnéticas ... 288
5.7.1.12 Ultrasonido ... 288
5.7.1.13 Ensayos y controles no destructivos ... 288
5.7.1.14 Control de ruido ... 288
5.7.1.15 Filtros magnéticos ... 288
5.7.1.16 Corrientes inducidas ... 288
5.7.2 Técnicas de control y monitoreo de condición de estado ... 289
5.8 Resumen del Capítulo 5 – Nivel Instrumental ... 291
5.9 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 5 ... 291
6 Niveles Estratégico, Táctico y Operacional ... 297
6.1 Objetivo de Capítulo 6 ... 297
6.2 Introducción a Capítulo 6 ... 297
6.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 6 – Niveles Estratégico, Táctico y Operacional ... 297
6.3 Nivel Operativo ... 297
6.3.1 Acciones correctivas ... 298
6.3.2 Acciones modificativas ... 298
6.3.3 Acciones preventivas ... 299
6.3.4 Acciones predictivas ... 301
6.4 Nivel Táctico ... 303
6.4.1 Implicaciones de las diferentes clases de tácticas de mantenimiento ... 304
6.4.1.1 TPM - Mantenimiento Productivo Total ... 305
6.4.1.1.1 Pilares del TPM ... 306
6.4.1.2 RCM - Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad ... 307
6.4.1.3 Mantenimiento combinado TPM & RCM ... 312
6.4.1.4 Mantenimiento Proactivo ... 313
6.4.1.5 Táctica PMO – Planned Maintenance Optimisation ... 317
6.4.1.6 Decisiones conjuntas o múltiples sobre tácticas ... 318
6.4.1.7 Mantenimiento Reactivo ... 318
6.4.1.8 Mantenimiento orientado a resultados ... 319
6.4.1.9 Mantenimiento de clase mundial - World Class Maintenance – WCM ... 320
6.4.1.10 Mantenimiento Centrado en Habilidades y Competencias (Core Competences Maintenance) 321
6.4.1.11 Otras tácticas ... 322
6.4.1.11.1 Propia ... 322
6.5 Nivel Estratégico - Costos e Índices ... 322
6.5.1 Índices internacionales ... 322
6.5.2 Costos ... 323
6.5.2.1 Costos fijos ... 324
6.5.2.2 Costos variables ... 324
6.5.2.3 Costos financieros ... 324
6.5.2.4 Costos de la no disponibilidad por fallas ... 324
6.5.3 Indicadores ... 325
6.5.3.1 Indicadores para la alta dirección. Estratégicos ... 325
6.5.3.2 Indicadores de orden Operativo ... 326
6.5.4 Terotecnología – LCC ... 326
6.5.4.1 Costo de ciclo de vida (LCC) ... 327
6.5.5 Gestión de Activos ... 328

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

6.6 Resumen del Capítulo 6 – Niveles Estratégico, Táctico y Operacional 329
6.7 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 6 329
7 Bibliografía 331

Ejemplos

Ejemplo 1 - Disponibilidad Genérica (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_G 69
Ejemplo 2 - Disponibilidad Inherente (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_I 70
Ejemplo 3 - Disponibilidad Alcanzada (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_A 72
Ejemplo 4 - Disponibilidad Operacional (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_O 74
Ejemplo 5 - Disponibilidad Operacional Generalizada (cálculos puntuales sin distribuciones)- D_{OG} 76
Ejemplo 6 - Curva de confiabilidad en A_I, Registros Históricos y cálculos de βeta y Eta, Weibull 81
Ejemplo 7 - Ejemplo de Curva de Mantenibilidad en A_I - Registros Históricos y cálculos con βeta y Eta, Weibull 88
Ejemplo 8 - Varias curvas de confiabilidad diferentes para el mismo MTBF 92
Ejemplo 9 - Varias curvas de mantenibilidad diferentes, para el mismo MTTR 93
Ejemplo 10 - Método de estimación i-kaésimo para A_I 95
Ejemplo 11 - Método de estimación de Rango de Medianas Tabla para A_I 100
Ejemplo 12 - Método de estimación de no confiabilidad o mantenibilidad por Aproximación de Rango de Medianas Benard para A_I. 101
Ejemplo 13 - Método de estimación de no confiabilidad o mantenibilidad de Kaplan-Meier Modificado para A_I. 102
Ejemplo 14 - Curvas y valores de No Confiabilidad F(t) estimadas por los cuatro métodos descritos 102
Ejemplo 15 - Curvas y valores de Mantenibilidad M(t) estimadas por los cuatro métodos descritos 103
Ejemplo 16 - Método de estimación de No Confiabilidad con datos censurados para A_I. 104
Ejemplo 17 - Método de estimación de Mantenibilidad con datos censurados para A_I 106
Ejemplo 18 - Ejemplo A_I para uso de papel Weibull 117
Ejemplo 19 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de Weibull para A_I 126
Ejemplo 20 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de distribución Normal para A_I 133
Ejemplo 21 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de distribución LogNormal para A_I 139
Ejemplo 22 - Cálculo y estimación de parámetros mediante Distribución Gamma para cálculos de A_I 143
Ejemplo 23 - Cálculos de estructuras en serie 157
Ejemplo 24 - Cálculos de estructuras en paralelo o redundancia activa 158
Ejemplo 25 - Cálculos de estructura mixta 159
Ejemplo 26 - Cálculo de confiabilidad Rs, de tres elementos dispuestos en serie y paralelo con parámetros βeta, Eta y MTBF 160
Ejemplo 27 - Aplicación Integral con cálculos con distribuciones 165
Ejemplo 28 - Simulación de corto plazo en la Disponibilidad Operacional (cálculos con distribuciones) 175
Ejemplo 29 - Detalle de cálculos en cada evento - Aplicación Integral con cálculos con distribuciones. 183
Ejemplo 30 - Mediciones CMD en turbinas pronosticadas con series temporales 193
Ejemplo 31 - Diagramas de dispersión, correlación y regresión lineal 229
Ejemplo 32 - Determinación del tamaño muestral para calcular medias 231
Ejemplo 33 - Ejemplo simple de análisis de fallas. 238
Ejemplo 34 - Estimación del nivel de servicio al cliente 259
Ejemplo 35 - Asignación de excesos para artículos Push 266
Ejemplo 36 - Cálculo de M, nivel máximo de inventarios en Pull 272
Ejemplo 37 - Cantidad óptima para pedidos Pull únicos 275
Ejemplo 38 - Ejemplo de diagnóstico Jerarquía Analítica 283

Ejercicios a resolver

Ejercicio 1 - Integral de Capítulos 2 y 3 164
Ejercicio 2 - Integral de Capítulo 4 198
Ejercicio 3 - Productividad – Capítulo 5 293
Ejercicio 4 - Clasificación Push, Pull o retiro de almacén – Capítulo 5 293
Ejercicio 5 - Push por Asignación - Capítulo 5 295
Ejercicio 6 - Cálculos generales de un Almacén - Capítulo 5 295

Material de apoyo en el CD

Programa de CD 1 - Estimación de Parámetros para Distribución Gamma y Método de Máxima Verosimilitud MLE 145
Programa de CD 2 - Estimación de parámetros mediante Método de Máxima Verosimilitud con Weibull de A_I 149
Programa de CD 3 - Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste 151
Programa de CD 4 - Cálculo de Pronósticos Clásicos de series temporales 194
Programa de CD 5 - Power Point – Presentación de Sistemas Visuales – 5S 220
Programa de CD 6 - Distribución Normal Z y Probabilidades 228
Programa de CD 7 - Determinación de tamaño muestral para medias 232
Programa de CD 8 - Casos reales de Análisis de Fallas 241
Programa de CD 9 - Aplicación de RCFA 243
Programa de CD 10 - Organizador Excel FMECA 256
Programa de CD 11 - Relación de Severidad Ocurrencia Detección FMECA 256
Programa de CD 12 - Cálculos Asignación & EOQ Push 268
Programa de CD 13 - Cantidades Pull 276
Programa de CD 14 - Inventarios automático de 10000 Referencias 276
Programa de CD 15 - Flash Audit 280
Programa de CD 16 - Programa de CD 16 - Variables de factores productivos 281
Programa de CD 17 - Instrumento 1 de diagnóstico J A 281
Programa de CD 18 - Método J A 283
Programa de CD 19 - Instrumento 2 de J A 283
Programa de CD 20 - Resultados generales J A 283
Programa de CD 21 - Proceso J A de Matrices Eigen vector en Mat Lab 284
Programa de CD 22 - Desgaste y Análisis de Fallas aportado por Dr. L. E. Benítez - Universidad Nacional de Colombia Bogotá 285
Programa de CD 23 - Vídeo RCM 310
Programa de CD 24 - Aplicación RCM fundamentada en normas SAE JA 1011 y 1012 311
Programa de CD 25 - Formato Word RCM 311

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Programa de CD 26 - Organizador RCM o FMECA 311
Programa de CD 27 - LCC 328

Ilustraciones

Ilustración 1 - Algunos avances tecnológicos de China en la antigüedad 21
Ilustración 2 - Reloj elefante de Al-Jazari, con mecanismos muy complejos. 22
Ilustración 3 - Observaciones del espacio celeste generan grandes avances en las leyes de la mecánica 22
Ilustración 4 - Evolución histórica. 26
Ilustración 5 - Acciones posibles de realizar antes o después de la falla (etapas I y/o II) 27
Ilustración 6 - Evolución del TPM en el tiempo 31
Ilustración 7 - Relación entre TPM y Terotecnología 32
Ilustración 8 - Programa Flash Audit inglés, para el análisis y diagnóstico de mantenimiento 34
Ilustración 9 - Objetivos del mejoramiento del programa Flash Audit y áreas que cubre 34
Ilustración 10 - Radar del mantenimiento de Flash Audit y áreas que cubre 34
Ilustración 11 - Opciones de estructuras organizacionales de mantenimiento 35
Ilustración 12 - Estructuras posibles de dependencia de mantenimiento 36
Ilustración 13 - Estructura sistémica, organizacional y funcional de mantenimiento 37
Ilustración 14 - Enfoque Sistémico Integral Kantiano de Mantenimiento Estratégico 38
Ilustración 15 - Principios básicos de mantenimiento 41
Ilustración 16 - Elementos de un sistema kantiano 47
Ilustración 17 - Sistema de agregación de valor fabril, empresarial o de servicios 47
Ilustración 18 - Unidad básica de Producción 48
Ilustración 19 - Unidad elemental de Mantenimiento 48
Ilustración 20 - Funciones primarias de Mantenimiento 49
Ilustración 21 - Sistema Integrado de Ingeniería de Fábricas: Mantenimiento–Máquinas–Producción 50
Ilustración 22 - Elementos estructurales de ingeniería de fábricas 51
Ilustración 23 - Niveles de mantenimiento de la casa ESReDa 52
Ilustración 24 - Objeto del mantenimiento 53
Ilustración 25 - Agentes que generan fallas o desgastes en los equipos 53
Ilustración 26 - Efecto del espacio y del tiempo (enfoque kantiano) sobre los equipos 54
Ilustración 27 - Niveles y categorías del mantenimiento bajo enfoque sistémico 54
Ilustración 28 - Diagrama de estados de un equipo (perfil de funcionalidad) 57
Ilustración 29 - Modelo universal e integral, propuesto para la medición CMD 61
Ilustración 30 - Tiempos importantes, siglas y demás convenciones que se usan en la medición y predicción CMD 63
Ilustración 31 - Primera etapa de datos, para la predicción CMD 64
Ilustración 32 - Etapa dos de selección de disponibilidad a usar en predicción CMD 65
Ilustración 33 - Etapa tres de parametrización y alineación de Weibull, o de uso de MLE 65
Ilustración 34 - Cuarta fase de validación de ajuste y bondad de Weibull o búsqueda de otra función 66
Ilustración 35 - Etapa cinco, para parametrizar y alinear o MLE de otra función 66
Ilustración 36 - Etapa seis de cálculos, predicciones y estrategias CMD 67
Ilustración 37 - Ejemplos de diferentes disponibilidades 77
Ilustración 38 - Factores que afectan la funcionalidad de los equipos y las disponibilidades que los consideran 78
Ilustración 39 - Relaciones y leyes que gobiernan un sistema de mantenimiento 78
Ilustración 40 - Pasos de parámetros en predicción CMD 79
Ilustración 41 - Descripción de CMD en el tiempo, funciones y responsabilidades 85
Ilustración 42 - Curva de la bañera o de Davies 87
Ilustración 43 - Curva de Davies, acciones y tácticas adecuadas, acorde al valor del βeta 88
Ilustración 44 - Ciclo general de actividades de reparaciones correctivas y/o mantenimientos planeados 91
Ilustración 45 - Dos casos con igual disponibilidad (método puntual) y comportamientos antagónicos 92
Ilustración 46 - Distribuciones para estimación CM 94
Ilustración 47 - Tabla de valores de F(t) y de M(t) para Rango de Medianas – Tabla 97
Ilustración 48 - Comparación de los cuatro métodos de estimación con diferentes N y, parámetros en Weibull 107
Ilustración 49 - Parámetro de forma βeta de Weibull 112
Ilustración 50 - Gráficas para diferentes βetas de f(t), λ(t) y F(t) en Weibull 114
Ilustración 51 - Comportamiento de λ(t), f(t) y F(t) de algunas distribuciones 115
Ilustración 52 - Papel de Weibull o Allen - Plait 118
Ilustración 53 - Papeles de alineación para distribuciones Normal, LogNormal y Exponencial 120
Ilustración 54 - Ajuste de una línea recta en los ejes X o Y 122
Ilustración 55 - Funciones de Confiabilidad, de Densidad de probabilidad de Fallas y de Tasa de Fallas de la distribución Normal. 132
Ilustración 56 - Funciones de Confiabilidad, de Densidad de probabilidad de Fallas y de Tasa de Fallas de la distribución LogNormal 136
Ilustración 57 - Función Tasa de Fallas en LogNormal para diferentes valores de m y s - Hazard Function 137
Ilustración 58 - Cuarta fase de validación de ajuste y bondad de Weibull o búsqueda de otra función 138
Ilustración 59 - Zonas comunes del βeta en Weibull (para cálculos de la Tasa de Fallas y otros parámetros) con otras Distribuciones 139
Ilustración 60 - Funciones de Confiabilidad, de Densidad de probabilidad de Fallas y de Tasa de Fallas de la distribución Gamma 142
Ilustración 61 - Función de densidad f (t_j) para Distribución Gamma 147
Ilustración 62 - Tasa de Fallas λ (t_j) para Distribución Gamma 148
Ilustración 63 - Síntesis comparativa de resultados de MTBF y MTTR con diferentes distribuciones y métodos 151
Ilustración 64 - Valores críticos para el estadístico D de Kolmogórov - Smirnov 153
Ilustración 65 - Valores críticos en Anderson-Darling 154
Ilustración 66 - Jerarquía en sistemas de producción o servicio 156
Ilustración 67 - Estructuras de sistemas de producción o servicio 157
Ilustración 68 - Curvas de función de densidad, confiabilidad, tasa de fallas y no confiabilidad en confiabilidad correctiva en el ejercicio integral A_O 177
Ilustración 69 - Curvas de función de densidad, confiabilidad, tasa de fallas y no confiabilidad en mantenimientos planeados en el ejercicio integral 178
Ilustración 70 - Comportamiento en las zonas de la curva de la bañera 179
Ilustración 71 - Curvas de acciones correctivas de función de densidad, mantenibilidad y tasa de reparaciones en ejercicio integral A_O 180
Ilustración 72 - Curvas de mantenimientos planeados de función de densidad, mantenibilidad y tasa de reparaciones en ejercicio integral A_O 181
Ilustración 73 - Series Temporales bajo el método científico 186
Ilustración 74 - Clasificación y caracterización de los métodos futurísticos 187
Ilustración 75 - Tipos, criterios y usos de los diferentes Modelos de Pronósticos 189
Ilustración 76 - Fenómeno exógeno en un modelo AR.I.MA. 190
Ilustración 77 - Metodología AR.I.MA. Box – Jenkins 192
Ilustración 78 - Procesos generales de los modelos AR.I.MA., con metodología Box - Jenkins 192
Ilustración 79 - Integralidad de métodos futurísticos actuales 193
Ilustración 80 - Ejemplo de curvas características de la distribución Hastings de dos fases, basada en Weibull de 2 y 3 parámetros 196
Ilustración 81 - Ejemplo de curvas características de la distribución Hastings con fórmulas de Ramakumar 196
Ilustración 82 - Elementos del nivel instrumental en mantenimiento 202
Ilustración 83 - Curvas de Cantidad de Servicios, Servicios Promedio y Productividad para un FP 207
Ilustración 84 - Curvas de Cantidad de Servicios, Servicios Promedio y Productividad para dos FP 209
Ilustración 85 - Manejo de Múltiples Factores Productivos para generar servicios de mantenimiento 209
Ilustración 86 - Correspondencia y analogía entre los diferentes parámetros de medición de la gestión y operación de mantenimiento (de producción o de una empresa) 213
Ilustración 87 - Instrumentos básicos y avanzados 213

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 88 - Relación entre mantenimiento, calidad y producción 215
Ilustración 89 - Algunas inconveniencias del Overhaul en la Curva de la Bañera 216
Ilustración 90 - Diferentes procesos de mejora continua en el tiempo, todos basados en las 5S 218
Ilustración 91 - Significado y acciones de cada una de las 5S 218
Ilustración 92 - Objetivos y propósitos de las 5S 219
Ilustración 93 - Desarrollo del mejoramiento continuo en mantenimiento 221
Ilustración 94 - Elementos, sistema y conceptos básicos del Vital Signs Performance de Hronec 223
Ilustración 95 - Gráfico y Diagrama de Pareto 225
Ilustración 96 - Diagrama causa-efecto de Ishikawa 226
Ilustración 97 - Histograma de tiempos de no funcionalidad 226
Ilustración 98 - Distribución normal con sus parámetros μ, σ y su probabilidad 227
Ilustración 99 - Gráfica de control de proceso 230
Ilustración 100 - Tipos de gráficos de control de procesos de mantenimiento 230
Ilustración 101 - Tabla de distribución normal para probabilidades y Z 233
Ilustración 102 - Aplicabilidad de FMECA y RCM según falla y causa 235
Ilustración 103 - Diferencia entre RCM y FMECA, con relación a parámetros que usan 235
Ilustración 104 - Fallas crónicas frente a Fallas Esporádicas 236
Ilustración 105 - Modos de Fallas y sus lazos 237
Ilustración 106 - Condiciones estándares en fallas 237
Ilustración 107 - Proceso de Análisis de Fallas 238
Ilustración 108 - Método de análisis de fallas, formato de registro 239
Ilustración 109 - Identificación de los roles en los grupos caza-fallas, mediante sombreros 240
Ilustración 110 - Actuaciones en el RCFA 241
Ilustración 111 - Árbol Lógico en el RCFA 243
Ilustración 112 - Etapas de implementación del RCFA 243
Ilustración 113 - Volumen de control del Sistema 244
Ilustración 114 - Algunos componentes del Sistema 245
Ilustración 115 - Algunos componentes de Unidades 246
Ilustración 116 - Características técnicas de algunos elementos, unidades o sistema 246
Ilustración 117 - Construcción literal de una función 247
Ilustración 118 - Funciones del sistema de bombeo 248
Ilustración 119 - Fallas Funcionales y Modos de Fallas en Sistema de Bombeo 251
Ilustración 120 - Tablas de los valores de criterios de Severidad, de Ocurrencia y Detección 252
Ilustración 121 - Calificación RPN, tareas y logística de realización en procedimiento FMECA 254
Ilustración 122 - Escala de Frecuencia - Riesgo - RPN 255
Ilustración 123 - Clasificación de la Severidad de las Consecuencias 255
Ilustración 124 - Matriz Modeladora del Riesgo. Relación Probabilidad / Consecuencia 255
Ilustración 125 - Volumen de riesgo en el procedimiento FMECA 256
Ilustración 126 - Factores que generan no funcionalidad o no disponibilidad en los equipos 256
Ilustración 127 - Costos de inventarios 258
Ilustración 128 - Datos reales - Inventarios - Clasificación A B C 260
Ilustración 129 - Clasificación ABC Inventarios 262
Ilustración 130 - Ciclo general de inventarios 264
Ilustración 131 - Retiro de referencias e Inventario a mantener – ABC 265
Ilustración 132 - Push & Pull 266
Ilustración 133 - Cantidades óptimas a pedir en Push 267
Ilustración 134 - Pedir en Push el máximo de Asignación versus EOQ 268
Ilustración 135 - Parámetros relevantes en reposición Pull 269
Ilustración 136 - Sistema Q con lead time cero 270
Ilustración 137 - Sistema Q en Pull con lead time positivo 270
Ilustración 138 - Sistema T o P en Pull 271
Ilustración 139 - Sistema R-M (Mínimo-Máximo) en Pull 271
Ilustración 140 - Sistema T-R-M en Pull 272
Ilustración 141 - Combinaciones posibles Q de demanda y Q de reposición 273
Ilustración 142 - Tiempos y momentos de pedir Pull bajo RMT 274
Ilustración 143 - Cantidades óptimas a pedir en Pull 275
Ilustración 144 - Causas de falta de nivel de acierto en la subcontratación de mantenimiento 277
Ilustración 145 - Conceptos de arquitectura estratégica en servicios de mantenimiento 278
Ilustración 146 - Proceso decisional integral de tercerización bajo enfoque internacional 278
Ilustración 147 - Áreas y tópicos que cubre y diagnostica el Flash Audit. 279
Ilustración 148 - Resultados del Flash Audit 280
Ilustración 149 - Tabla de calificaciones de importancia relativa entre criterios J A 281
Ilustración 150 - Condicionantes de importancia relativa en J A 282
Ilustración 151 - Sistema de monitoreo y chequeo permanente con vibraciones 287
Ilustración 152 - Algunas características de diferentes instrumentos avanzados técnicos de mantenimiento 289
Ilustración 153 - Comparación de tres instrumentos avanzados específicos técnicos de técnicas de control 290
Ilustración 154 - Clasificación real o mental de los niveles de mantenimiento 297
Ilustración 155 - Reglas y relaciones cíclicas entre los elementos de mantenimiento para las acciones 299
Ilustración 156 - Algunos aspectos relevantes de las tareas o acciones preventivas 300
Ilustración 157 - Situaciones de las acciones preventivas 301
Ilustración 158 - Situaciones de las acciones predictivas 302
Ilustración 159 - Aplicación de acciones y tácticas acorde a los valores CMD y βeta que se tengan 304
Ilustración 160 - Plan maestro para la aplicación de una táctica TPM en una empresa 307
Ilustración 161 - Beneficios del mantenimiento centrado en confiabilidad 309
Ilustración 162 - Algunas de las normas que gobiernan el RCM, son 310
Ilustración 163 - Etapas de aplicación del RCM 310
Ilustración 164 - Pasos del procedimiento individual RCM (archivo RCM.xls del CD adjunto) 311
Ilustración 165 - Etapas en la implementación global del RCM 312
Ilustración 166 - Estructura Proactiva empresarial 315
Ilustración 167 - Ciclos de vida y actividades de la táctica proactiva 316
Ilustración 168 - Pasos del PMO 317
Ilustración 169 - Orígenes de la información en PMO 317
Ilustración 170 - Líneas de acción de la táctica por resultados 319
Ilustración 171 - Costos asociados a los niveles kantianos de mantenimiento 323
Ilustración 172 - Control integral de Fayol y su asociación con costos 325
Ilustración 173 - Etapas de la Terotecnología 327
Ilustración 174 - Estrategias de aplicación de la Terotecnología 327
Ilustración 175 - LCC 328

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ecuaciones

Ecuación 1 - HPP 59
Ecuación 2 - NHPP 60
Ecuación 3 - Eficiencia general de cualquier índole 67
Ecuación 4 - Relación de disponibilidad 67
Ecuación 5 - Relación de disponibilidad 67
Ecuación 6 - Disponibilidad Genérica sin mantenimientos preventivos- A_G 68
Ecuación 7 - Disponibilidad Genérica con mantenimientos preventivos 68
Ecuación 8 - Transformaciones de MTBF, UT, MTTR, DT, etc. 69
Ecuación 9 - Equivalencias de UT con TBF y de DT con TTR 70
Ecuación 10 - Disponibilidad Inherente o Intrínseca - A_I 70
Ecuación 11 - Disponibilidad Alcanzada - A_A 71
Ecuación 12 - Disponibilidad Operacional - D_O - A_O 73
Ecuación 13 - Disponibilidad Operacional Generalizada - A_{GO} 75
Ecuación 14 - Probabilidades de ocurrencia de un evento (de falla) y confiabilidad 80
Ecuación 15 - Representación matemática de la función de confiabilidad 81
Ecuación 16 - Representación matemática de la función de mantenibilidad 88
Ecuación 17 - Método de estimación i-kaésimo para A_I 95
Ecuación 18 - Ecuación de la distribución binomial acumulada, para la estimación por Rango de Medianas puro. Tabla 100
Ecuación 19 - Aproximación de Benard para el Rango de Mediana 100
Ecuación 20 - Método de estimación Kaplan-Meier para A_I 101
Ecuación 21 - Método de estimación Kaplan-Meier Modificado para A_I 101
Ecuación 22 - Cálculos del Incremento y Número de Orden, en métodos de estimación de datos censurados 105
Ecuación 23 - Análisis de tasa de fallas, función de confiabilidad, función de densidad y función acumulada en Weibull 113
Ecuación 24 - Ecuaciones de Weibull para alinear los datos y usar el papel de esta distribución 116
Ecuación 25 - Análisis de mínimos cuadrados 123
Ecuación 26 - Definición matemática de la pendiente y del intercepto de la recta alineada estimada 123
Ecuación 27 - Ajuste de la recta alineada 123
Ecuación 28 - Error estándar del estimado de la recta alineada 124
Ecuación 29 - Coeficiente de determinación muestral r^2 de la recta alineada 124
Ecuación 30 - Coeficiente de determinación muestral r^2 ajustado de la recta alineada 124
Ecuación 31 - Definición matemática del coeficiente de correlación múltiple 125
Ecuación 32 - Transformación en Weibull para los valores Y y X 125
Ecuación 33 - MTBF Weibull. 126
Ecuación 34 - MTTR Weibull 126
Ecuación 35 - Transformación en Normal para los valores Y y X. 130
Ecuación 36 - MTBF Normal. 131
Ecuación 37 - MTTR Normal 131
Ecuación 38 - Funciones de densidad de probabilidad de fallas y de Tasa de Fallas en Normal 131
Ecuación 39 - Transformación en LogNormal para los valores Y y X 134
Ecuación 40 - MTBF LogNormal 135
Ecuación 41 - MTTR LogNormal 135
Ecuación 42 - Funciones de densidad de probabilidad de fallas y de Tasa de Fallas en Log Normal 136
Ecuación 43 - Función de densidad en Distribución Exponencial 141
Ecuación 44 - Distribución Gamma 141
Ecuación 45 - Función de máxima verosimilitud 148
Ecuación 46 - Función de distribución acumulada empírica K-S 152
Ecuación 47 - Estadístico de la prueba K-S 153
Ecuación 48 - Hipótesis de distribución acumulada empírica A-D 153
Ecuación 49 – Estadístico de la prueba empírica A-D 154
Ecuación 50 - Valores críticos modificados en Anderson-Darling 154
Ecuación 51 - Hipótesis de distribución acumulada empírica Ji^2 155
Ecuación 52 - Estadístico para la prueba Chi cuadrado Ji^2 155
Ecuación 53 - Cálculo de la frecuencia esperada en Ji^2 155
Ecuación 54 - Confiabilidad de un sistema en serie 156
Ecuación 55 - Confiabilidad de un sistema de estructura en paralelo con redundancia activa 158
Ecuación 56 - Distribución Hastings 195
Ecuación 57 - Función de densidad de Hjorth 197
Ecuación 58 - Cantidad de Servicios, SP Servicios Promedio y Productividad de Servicios para entidades de servicios de mantenimiento 207
Ecuación 59 - Punto ideal donde Servicios Promedios sea similar a Productividad. 208
Ecuación 60 - Punto óptimo de gestión de mantenimiento instrumental para dos Factores Productivos FP 1 y FP 2 209
Ecuación 61 - Punto óptimo de gestión de mantenimiento instrumental para dos Factores Productivos FP 1 y FP 2 209
Ecuación 62 - Estandarización en distribución normal, mediante la transformación de una variable aleatoria x en: 228
Ecuación 63 - Límites para gráficos de control de procesos de mantenimiento 230
Ecuación 64 - Fórmulas para determinar el tamaño muestral en medias de proporciones o valores. 231
Ecuación 65 - Cálculo del RPN 250
Ecuación 66 - Estimación de la Severidad 250
Ecuación 67 - Fórmulas de A, Y y X para Clasificación A B C de Inventarios 261
Ecuación 68 - Cantidad óptima a pedir, con el mínimo costo para reponer inventarios - EOQ. 267
Ecuación 69 - Pedido óptimo con reposición no inmediata 270
Ecuación 70 - Estimación del nivel máximo M de inventarios de Pull. 271
Ecuación 71 - Estimadores de cantidades únicas especiales en Pull. 273
Ecuación 72 - ROP - Tipo C - Demanda y LT conocidos, tiempo de entrega inmediata 274
Ecuación 73 - ROP - Tipo B - Demanda desconocida y LT conocido 274
Ecuación 74 - ROP - Tipo A - Demanda y LT desconocidos 274
Ecuación 75 - Táctica hacia resultados 319
Ecuación 76 - Estimación del costo por fallas 324
Ecuación 77 - Efectividad y LCC en mantenimiento 327

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

0 Prólogo

Es importante encontrar un trabajo tan serio, estructurado y bien presentado que aborda diferentes temáticas de mantenimiento, producción y calidad en simultáneo, con fundamentos teóricos simples de muy buena profundidad y fáciles de implementar en las empresas. La presentación de un libro siempre es una tarea comprometida. Unas veces por el compromiso que se tiene con el Autor, otras por el compromiso que se debe tener con la ciencia, entendida ésta en un sentido amplio y no ajeno a planteamientos éticos vitales.

El compromiso con el Autor nos llevaría a elaborar un texto de carácter laudatorio, en el que se enumeraran las excelencias humanas y profesionales del mismo, y tal vez el compromiso con la ciencia nos llevara a realizar una crítica, prolija y no siempre favorable, de los contenidos de la obra. El conflicto estaría entonces servido. Afortunadamente en este caso ese conflicto no existe, pues la buena calidad, actualidad, profundidad y practicidad de la obra se corresponde con la buena calidad humana, con lo cual ciencia y amistad pueden ir de la mano.

El autor, el asesor, el profesor, consultor y amigo Dr. Luis Alberto Mora, aúna dos facetas de gran importancia para un consultor empresarial y académico del área de las ingenierías, en que brillantemente se lleva desempeñando hace años. Esas dos facetas son la sólida formación técnico-científica y la experiencia profesional en el que muchas veces llamamos, desde la academia, "mundo real", en este libro se logra construir un puente muy sólido de fácil acceso en ambas direcciones, entre estos dos mundos tan aislados como son la industria y a la academia.

Un investigador, docente y experto consultor en el campo de las Ingenierías no debiera nunca estar falto de estas dos facetas, pues la carencia de cualquiera de ellas hará que sus experiencias y enseñanzas queden faltas de rigor o de aplicabilidad, comprometiéndose la utilidad que los empresarios, los industriales, los ingenieros, los alumnos, los futuros técnicos de la empresas, etc. vayan o obtener de ellas.

El presente libro aborda varios temas de importancia clave para muchas empresas de servicios e industriales, y que han generado una auténtica revolución en los últimos años. En el mar de siglas y abreviaturas que, desgraciada e inevitablemente, inunda el mundo de la calidad, del mantenimiento, de la producción y su entorno.

Se han abierto paso con una singladura firme conceptos como el RCM, el TPM, la confiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad, los inventarios de repuestos, el PMO, el CMD y algún otro, que suponen en parte el triunfo del paradigma de la Calidad Total en el ámbito del mantenimiento. Estos y otros temas son presentados y analizados en la presente obra con suficiencia y practicidad científica y empresarial, junto con otros planteamientos más clásicos pero de vigencia incuestionable. Pero vale la pena enfatizar en el nuevo enfoque que se presenta, sobre cómo se deben abordar las estrategias de la ingeniería de mantenimiento, bajo un enfoque sistémico estructurado, de una manera muy coherente y con aplicaciones extremadamente exitosas en diferentes regiones del mundo.

No olvida el autor el tener presentes las consideraciones económicas, dedicando un interesante capítulo al tema de los costes asociados al mantenimiento y al LCC, cuya consideración nunca puede ser obviada por los técnicos del área, pues son definitivamente temas de costes los que nos harán optar, según las circunstancias, entre reparar y sustituir un equipo. Los lectores del libro lograrán, pues, aprender a plantear nuevos modos, entender integralmente formas más sistémicas y específicas concretas, de abordar el tema del mantenimiento, tanto como a manejarse con comodidad y aplicabilidad en entornos más tradicionales.

En ambos casos la información y la formación presentes en la obra hacen su lectura altamente recomendable para los profesionales del área o para los estudiosos del tema.

Firmado,

Andrés Carrión García
Ph.D. en Ingeniería Industrial
Director del Departamento de Estadística, Confiabilidad e Investigación Operativa
Universidad Politécnica de Valencia - Valencia – España

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Prólogo

0.1 Estructura, novedades y concepción del libro

El libro se fundamenta en un nuevo enfoque sistémico kantiano que permite entender, manejar y controlar un sistema de mantenimiento y producción, bajo los más modernos y rigurosos conceptos científicos y prácticos encontrados a través de muchos años de experiencia y estudio del autor, en varios continentes.

Está diseñado de tal manera que todos los conceptos se manejan con el más puro tratamiento científico, con aplicaciones fáciles de entender y de llevar a cabo en las empresas.

La estructura del libro se desarrolla en dos partes:

- La primera es de fundamentación, niveles, conceptos y reglas entre los elementos fundamentales de mantenimiento; esto incluye los capítulos 1 al 4.

- La segunda parte consta de los cuatro niveles de mantenimiento, así:

    - Nivel instrumental, del capítulo 5.
    - Niveles operacional, táctico y estratégico en el capítulo 6.

La aplicación de conceptos relevantes sobre la medición real de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad se desarrolla de una forma seria y sencilla de entender que permite su aplicación en las empresas, se muestran los cálculos correctos que se deben realizar y sobre todo se describe su interpretación de tal manera que se puedan tomar acciones estratégicas que permitan su mejoramiento continuo.

Uno de los principales aportes consiste en definir las pautas para entender el mantenimiento como un sistema que posee niveles diferenciales con todos sus elementos, que tiene un lenguaje propio y específico, el cual permite una fácil comunicación entre los actores relevantes: mantenimiento, producción y máquinas.

La concepción integral y detallada del mantenimiento es un aporte relevante en este libro, ya que permite el manejo y el dominio rápido de todos los conceptos y las relaciones de unos con otros, destaca a su vez la necesidad de enfocar el mantenimiento en forma simultánea desde los cuatro niveles (instrumental, operativo, táctico y estratégico), en especial definiendo los niveles superiores de CMD[1], *LCC*[2] y costos con el fin de determinar los niveles inferiores que se manejan de abajo hacia arriba (desde las herramientas hasta encontrar la táctica más ajustada a las necesidades particulares de las empresas de servicios o empresariales).

Se recalca la importancia de medir y controlar de una forma planeada todos los niveles y las acciones de mantenimiento en forma simultánea, de abajo hacia arriba (que es lo normal en las empresas) y de forma inversa que es lo novedoso de este libro.

Es muy útil para llevar a la realidad los conceptos internacionales de mantenimiento, dada la diversidad de casos que se presentan, las ayudas en Excel y los ejercicios que se plantean; tanto en el libro como en el CD adjunto.

---

[1] *CMD – Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad. En inglés RAM - Reliability, Availability and Maintainability.*
[2] *LCC - Life Cycle Cost o Costo Económico del Ciclo de Vida integral.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

1 Introducción - Evolución de Mantenimiento y Producción

Las empresas generadoras de bienes y/o servicios que utilizan instalaciones, edificios, máquinas, equipos, herramientas, utensilios, dispositivos, etc., para lograr su objetivo social y empresarial, necesitan que estos activos se mantengan en un buen estado de funcionamiento, de confiabilidad, de mantenibilidad y de disponibilidad, acorde a sus necesidades, por lo cual las organizaciones empresariales deben procurar que la vida útil de sus equipos sea la máxima posible al mínimo costo alcanzable; lo cual se logra a través del mantenimiento industrial como una entidad de servicio a la producción. La forma de maximizar la eficacia, la eficiencia, la efectividad y la productividad[3] de los activos, es mediante el conocimiento y la aplicación de las leyes que gobiernan la relación entre producción y mantenimiento.

Las empresas no pueden adquirir permanentemente equipos nuevos para desarrollar su función, debido a los altos costos que requiere, por lo tanto es fundamental conservar en un buen estado de funcionalidad su parque industrial, durante ciertos períodos de tiempo (de mediano y largo plazo), para poder mantener precios competitivos en sus bienes o servicios; esto establece entonces una condición de servicio de largo plazo en el mantenimiento de su maquinaria.

A lo largo del tiempo se dan diferentes definiciones, aplicaciones y conceptos sobre mantenimiento, se presentan y se confrontan algunas de ellas en esta introducción, con el fin de entender correctamente el verdadero sentido y la finalidad del mantenimiento, para mostrar las evoluciones que existen y los objetivos, que para cada momento de la historia reciente tiene el área en estudio.

Los diferentes autores presentan cada una de las definiciones acordes a su momento, espacio y entorno en que existen, pero entre ellas hay elementos comunes y diferenciadores que aclaran al lector, lo que mantenimiento debe ser dentro de una empresa que produce bienes tangibles o servicios.

El mantenimiento, al ser una entidad de soporte a producción juega un rol diferente al que normalmente se le otorga, ya que básicamente al ser una entidad de servicio, su estructura es muy diferente al de las unidades operativas que generan bienes o servicios; por lo cual sus características son de apoyo y como tal debe manejarse con un enfoque logístico.

Los objetivos de mantenimiento sirven de fundamento logístico, para que otras áreas empresariales puedan cumplir su función de producción de bienes o servicios.

La complejidad empresarial de hoy en día, el gran desarrollo tecnológico involucrado en los equipos de producción y en edificios e instalaciones de prestación de servicio, hacen que el mantenimiento se deba estudiar y aplicar con mayor contenido científico, rigurosidad analítica y profundidad, si se desea que alcance su objetivo principal, bajo las condiciones actuales y futuras de sus clientes.

Los conceptos, las aplicaciones, las experiencias, el conocimiento empresarial e industrial, la trayectoria en consultoría y asesoría empresarial, las mejores prácticas internacionales, el desarrollo científico, las investigaciones empíricas y analíticas y, los demás aportes que hace el autor en este libro, son de amplia y útil aplicabilidad a empresas industriales, de servicios, hospitales, entidades bancarias, cines, acueductos, compañías de generación y transmisión eléctrica, entidades que producen y procesen alimentos, supermercados, minerías, clínicas, organismos militares, sociedades transportadoras (aire, tierra o mar), telefónicas, entidades de telecomunicaciones y, en general a todas aquellas organizaciones que produzcan bienes materiales y en especial a las generadoras de servicios y de apoyo a la comunidad. Básicamente se pretende llegar a los diferentes sectores de la economía: primario o cercano a la naturaleza, al secundario o de manufactura, al sector terciario o de servicios, etc. En todo caso el mantenimiento en las empresas utiliza un gran porcentaje del capital de trabajo de la organización industrial y se ubica entre las tres dependencias más relevantes en las empresas junto con logística y producción.

Es muy grande el esfuerzo que el autor ha colocado para que este libro sea de fácil entendimiento y aplicación, al

---

[3] *Productividad, entendida como la capacidad de generar mayor cantidad de bienes y/o servicios con los mismos factores productivos, o también puede interpretarse como producir los mismos bienes con una menor cantidad de recursos productivos, que los del punto de referencia.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

procurar que su contenido permita el mejoramiento de las empresas de servicios o bienes donde se apliquen sus conceptos y ejercicios.

1.1 Objetivo de Capítulo 1

Registrar los acontecimientos y hechos más relevantes de mantenimiento, producción e ingeniería de fábricas, que enmarcan en conjunto lo que es hoy en día esta área del conocimiento empresarial, con el fin de entender el rol, la función, la importancia y sus aplicaciones actuales – Nivel 1 – Conocer – Escala de Bloom, Barret y Gagñé (Gagné@, y otros, 2008)[4].

1.2 Introducción a Capítulo 1

La primera unidad pretende mostrar los hechos relevantes que marcan la incidencia y el estado del arte actual de mantenimiento y producción, de tal forma que permita conocer sus antecedentes y por ende los hotos que marcan su actual estado de desarrollo y enfoque, para entregar los criterios relevantes y prioritarios que enmarcan el manejo, la gestión y la operación del mantenimiento industrial para cualquier persona que desee implementarlo con técnicas de última generación en su empresa o industria.

1.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 1 – Introducción

La persona que desee abordar la lectura de esta primera unidad, basta con que tenga alguna experiencia somera en el tema, o que en la actualidad profundice en el estudio de esta disciplina o materia a nivel de pregrado o postgrado, o de formación técnica; es importante que el lector tenga de antemano alguna experiencia real, mental o conceptual sobre el mantenimiento y la producción industrial, ya que el objetivo del mismo le permite profundizar en los conceptos y en el desarrollo histórico de ambas temáticas a través del tiempo, con el fin de estructurar su concepción integral básica sobre los temas de mantenimiento y producción a nivel industrial.

1.3 Evolución del mantenimiento

La principal función de mantenimiento es sostener la funcionalidad de los equipos y el buen estado de las máquinas a través del tiempo, bajo esta premisa se puede entender la evolución del área de mantenimiento al atravesar las distintas épocas acorde a las necesidades de sus clientes; que son todas aquellas dependencias y/o empresas de procesos o servicios, que generan bienes reales o intangibles mediante la utilización de estos activos, para producirlos.

La historia del mantenimiento como parte estructural de las empresas, data desde la aparición de las máquinas[5] para la producción de bienes y servicios[6], inclusive desde cuando el hombre forma parte de la energía de dichos equipos.

Se reconoce la aparición de los primeros sistemas organizacionales de mantenimiento para sostener las máquinas desde principios del siglo XX en los Estados Unidos donde todas las soluciones a fallas y paradas imprevistas de equipos se solucionan vía mantenimiento correctivo (Newbrough, y otros, 1982)[7], reconoce el autor Junior Reed la similitud de conceptos, pero se remonta al siglo XVIII con las teorías de producción de David Ricardo como el origen claro de los sistemas de mantenimiento (Reed, 1971) (Ricardo, 1817).

El progreso de mantenimiento permite distinguir varias generaciones evolutivas, en relación a los diferentes objetivos que se observan en las áreas productivas o de manufactura (y en mantenimiento) a través del tiempo; el análisis se lleva a cabo en cada una de estas etapas, que muestran las empresas en función de sus metas de producción para ese momento, la clasificación generacional relaciona las áreas de mantenimiento y producción en términos de evolución.

---

[4] *@ el símbolo de arroba se usa en este libro para denotar que la fuente es tomada de Internet y se clasifica en forma detallada en la Bibliografía.*

[5] *La función de mantenimiento parece originarse con la era de la industrialización con la aparición de los equipos organizados para producir. La misma aparición de producción genera la existencia de averías y fallas en los equipos, lo que conduce desde esa época hasta la actual en condiciones de gestión de mantenimiento(Sourís, 1992).*

[6] *Desde mediados del siglo X VIII en la era de la industrialización que ocurre originalmente en Inglaterra con la aparición de las teorías de David Ricardo, en los sistemas organizacionales de producción (Ricardo, 1817) (Reed, 1971).*

[7] *Las citas bibliográficas de este libro denotan (Autor(es), año). En el evento de tener interés detallado sobre el tema citado y referenciado en la bibliografía, se recomienda mirar obra completa. Cada cita tiene su correspondiente Referencia Bibliográfica al final. Las referencias bibliográficas que no son del autor se expresan a continuación de cada ilustración.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

1.3.1 Historia de hechos relevantes que inciden en el mantenimiento vigente

El mantenimiento[8] es el sustantivo correspondiente al verbo mantener, la función concreta de mantenimiento es sostener la funcionalidad y el cuerpo de un objeto o aparato productivo para que pueda cumplir su función de producir bienes o servicios, estos aparatos no son más que los objetos que genera la ingeniería en sus diferentes versiones, por ejemplo la ingeniería mecánica con sus máquinas, la ingeniería civil con edificaciones, puentes, carreteras, instalaciones físicas, la ingeniería eléctrica con sus sistemas de generación o transmisión eléctrica, la ingeniería electrónica con sus sistemas y aparatos electrónicos, etc.

En cada rama de la ingeniería cambian los objetos a cuidar para que funcionen correctamente, pero la función de mantener prima sobre la ingeniería en general, esto permite afirmar que el objeto que mejor reúne la función de producir otros bienes o servicios son las máquinas, a tal efecto se hace una revisión histórica sucinta y concreta de la ingeniería mecánica para describir los hechos antiguos y recientes, que inciden en mantenimiento en la actualidad (se deja constancia de que por el hecho de que se describen situaciones anteriores de ingeniería mecánica, el mantenimiento no es exclusivo de esta rama de la ingeniería; de hecho la OIT, define para la ingeniería en general, entre muchas otras, las funciones de construir, reparar y mantener objetos, producto de la ingeniería (OIT-CIUO88, 1988)).

La fundamentación del ejercicio profesional de la ingeniería mecánica se basa en el diseño, proyección, funcionamiento, conservación y reparación (estas dos últimas tareas son propias de mantenimiento) de maquinaria, instalaciones, sistemas industriales, etc., tal como lo define la OIT[9] (OIT-CIUO88, 1988) a través de las tareas, funciones y actividades de todas las ingenierías reconocidas universalmente. Este concepto de la ingeniería mecánica es ratificado en la definición de ingeniería ¨...conjunto de conocimientos por los que las propiedades de la materia y los recursos naturales de energía se hacen útiles al hombre mediante máquinas, estructuras, etc. ...¨ (que se verifica constatando el concepto de máquina alrededor de la ingeniería), en particular el concepto de la rama mecánica, - adjetivo – relativo a la máquina o a la mecánica – realizado por una máquina - tal como es descrito en el Gran Diccionario Enciclopédico(Grijalbo, 2000), lo cual ratifica y asocia de forma relevante el término máquina a mecánica; como se afirma en la definición del Diccionario Larousse ¨….mecánica: (derivado del latín *mékhané*, máquina en castellano)….parte de las matemáticas que estudia el movimiento y el equilibrio de fuerzas y de las máquinas...¨. Por lo cual existe una muy fuerte relación entre mantenimiento y mecánica.

En algunos casos se encuentra la asignatura universitaria "equipos industriales y mantenimiento" en programas de ingeniería industrial(Peterson, 1999), pero al respecto la OIT (OIT-CIUO88, 1988)se pronuncia sobre las ingenierías no clasificadas (numeral 2149) (64) dentro de las cuales aparecen industrial, producción, textiles, etc. entre otras, donde describe que estas solo se dedican a: ¨.....el desarrollo de procedimientos relativos a la eficiencia de la producción,……..sobre tecnologías de……..o procesos de fabricación...¨, pero no enuncia la maquinaria como su objeto, de lo que hace o estudia; más sin embargo como se explica anteriormente la mayoría de productos o servicios derivados de las otras ingenierías son objetos, artefactos o aparatos que ayudan a producir otros bienes o servicios, lo cual los hace susceptibles de aplicarles mantenimiento.

1.3.1.1 La ingeniería y las tareas de mantenimiento, O.I.T.[10]

La ingeniería es clasificada en el subgrupo 2145 (62), dentro del segmento 214 Arquitectos, Ingenieros y Afines, los cuales investigan, perfeccionan o desarrollan conceptos, teorías y métodos, o aplican los conocimientos de su especialización, en campos como la ingeniería o la tecnología y otros, o en la determinación de la eficiencia económica de procesos de producción[11].

Mantener, reparar y construir, son algunas de las tareas fundamentales de la ingeniería, según la OIT (OIT-CIUO88, 1988).

---

[8] *Según la real Academia Española, se define Mantenimiento, como: el conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que instalaciones, edificios, industrias, etc., puedan seguir funcionando adecuadamente(RAE@, 2008).*

[9] *O.I.T. - Oficina Internacional del Trabajo – Ginebra – Suiza – Clasificación internacional uniforme de ocupaciones: C.I.U.O.- 88 – Dirección O.I.T. CH – 1211 Ginebra, 22 – Suiza (OIT-CIUO88, 1988).*

[10] *Oficina Internacional del Trabajo – O.I.T. – Ginebra – Suiza – Clasificación internacional uniforme de ocupaciones: C.I.U.O.- 88 – Dirección O.I.T. CH – 1211 Ginebra, 22 – Suiza (OIT-CIUO88, 1988).*

[11] *Se resalta la importancia de este párrafo donde se enuncian aspectos básicos de mantenimiento, como son la ingeniería de fábricas, la conservación de equipos (tanto en su parte corporal y material, como en su dimensión funcional) mediante la tecnología, al igual son parte de las actividades presupuestadas para el mantenedor, procurar la alta eficiencia, eficacia y efectividad de los procesos productivos mediante su apoyo logístico en el mantenimiento.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La construcción aparece como un elemento estructural en el esquema que sugiere el Autor Rey Sacristán para comprender el marco del mantenimiento terotecnológico (Rodolfi@, 2000) (Husband, 1976) (Darnell, y otros, 1975)(Thompson, 1980), donde los usuarios (AOD[12]), los constructores, compradores y demás entidades o personas relacionadas con el cuerpo o la función de equipos industriales, son vitales en el diseño de esquemas de gestión de mantenimiento (Rey, 1996).

El mantenimiento y la reparación[13] son partes esenciales del objeto de estudio de la especialización, entendiéndose la función de mantenimiento dependiente del ciclo de vida de las máquinas en sus tres etapas (mantenimiento, reparación o sustitución) y la función de reparación como una especie de mantenimiento especial en un estado de uso (o abuso) más avanzado del equipo, es decir con una mantenibilidad[14] más reducida (Ávila, 1992).

Las últimas tareas descritas (construir, mantener y reparar) que se enuncian en el libro C.U.I.O.-88, son empleadas en: edificios, obras públicas, ciudades, zonas urbanas, otras obras propias de la ingeniería, o de la ingeniería mecánica y afines, y sus aplicaciones industriales-estructuras, instalaciones, máquinas y equipos, sistemas y en métodos de extracción de petróleo, gas natural y otros minerales o agua, de separación de metales y de refinación y tratamiento; procesos mecánicos, químicos o de otra índole; sirven también para estudiar y asesorar acerca de los aspectos tecnológicos de determinados materiales, productos o procesos industriales y para asuntos relacionados con la eficiencia de la producción y de la organización del trabajo(Dounce, 1998), como también se pueden usar en preparar ponencias e informes científicos o técnicos. Sus tareas incluyen la supervisión de otros trabajadores(OIT-CIUO88, 1988).

1.3.1.2 Historia sucinta de hechos de la ingeniería mecánica asociados a mantenimiento

La historia de las máquinas (sus desarrollos, avances y retrocesos), está enmarcada por múltiples hechos que de alguna manera inciden en el mantenimiento industrial vigente y actual, entre los hechos más relevantes se enuncian algunos, que permiten entender el mantenimiento de nuestra época.

1.3.1.2.1 Historia[15]

El desarrollo de los mecanismos y de las máquinas, tiene su origen en dos vertientes: en la ciencia denominada Arqueología permite el estudio histórico de los mecanismos que se usan desde la prehistoria[16] y en la vertiente biológica que es un gran trabajo continuo de la naturaleza en los seres vivos, que analiza los complejos mecanismos biológicos de los animales y de las plantas, a través del tiempo(Bautista, y otros, 2007). Desde la prehistoria el ser humano utiliza el sílex para la producción de sus máquinas, es decir cuchillos, martillos, hachas y demás instrumentos y utensilios; es decir el material sílex como una fuente de materia prima para sus instrumentos, más adelante usa basalto y otras rocas volcánicas (Barajas, 2003).

1.3.1.2.2 Diferentes culturas

Durante la efervescencia del Mundo Islámico en la Edad Media, se dan las bases de lo que posteriormente ocurre en el Renacimiento, donde se expande el concepto de la mentalidad creativa e innovadora en Italia, con su teatro y sus escenarios de máquinas, lo cual coincide con la publicación de los libros[17] sobre los ingenios y las máquinas[18]. Con la Revolución Industrial en Europa e Inglaterra se consolida todo el desarrollo anterior, dando

---

[12] Aprovisionamiento, Operación, Distribución, o expresado de otra forma son los departamentos internos: suministros, producción o comercialización de una empresa que son o pueden llegar a ser clientes del servicio del área de mantenimiento. Aunque se concibe que AOD pueden ser externos a la organización donde pertenece el área de mantenimiento prestadora del servicio.

[13] Mantenimiento, en esta obra se refiere a las tareas de mantenimiento que se realizan antes de que ocurra la falla (John Moubray las define como Tareas Proactivas(Moubray, 2004), también se denominan Planeadas (pertenecen a ellas las Acciones Preventivas y las Acciones Predictivas), por un lado; por el otro la denominación de Reparación se otorga en esta obra a las tareas de mantenimiento que se ejecutan después de la falla (se ubican en esta categoría las Acciones Correctivas y las Modificativas (entendiéndose por estas como mejoras de diseño o fabricación al equipo de mediana envergadura, dado que el correctivo que se usa en ese evento, no puede eliminar o solucionar la causa raíz de la falla).

[14] Mantenibilidad se define como la probabilidad de que un equipo que ha estado trabajando y que ha sufrido cierto nivel de desgaste y/o de pérdida de funcionalidad por desajuste, se pueda llevar a una condición especificada definida, dentro de un período de tiempo dado, mediante el uso de unos recursos determinados y Fiabilidad se define como la probabilidad de que un equipo desarrolle una función específica sin fallas, bajo unas condiciones normales durante un tiempo determinado (Morris@, 1999).

[15] Por diseño los títulos de nivel 5, en este libro no llevan numeración y aparecen en la forma en que este está dispuesto.

[16] Estos desarrollos probablemente abren el camino de progreso a las primeras civilizaciones organizadas y a la cultura grecorromana en Europa y a la china en Asia

[17] Veintiún libros.

[18] Que se atribuye a Juanelo Turriano: inventor, mecánico e ingeniero hidráulico italiano. No recibió estudios universitarios. Durante la coronación de Carlos V como emperador, se ofreció a construir un reloj astronómico que además de señalar la hora siguiera los movimientos de los planetas, el Sol y la Luna, y la aparición de los signos del Zodiaco. En esta obra empleó más de 20 años. Siempre bajo la protección del emperador, a quien acompañó en su retiro de Yuste, y posteriormente al servicio de Felipe II,

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

origen a una cultura que utiliza una máquina a su servicio (no al revés), con la secuencia de un vertiginoso crecimiento en la evolución y desarrollo de las máquinas y mecanismos, desde lo más recóndito de la historia hasta lo actual del siglo XIX, XX y XXI.

En la cultura china sobresale su gran progreso en la escritura y en los medios tecnológicos para masificarla, es en ocasiones superior a la que alcance en la Europa en el siglo XV, los chinos alcanzan grandes avances en la astronomía, biología, matemáticas, física e ingeniería, y en los aparatos en que se apoyan para ese crecimiento (China@, 2008).

Ilustración 1 - Algunos avances tecnológicos de China en la antigüedad

(China@, 2008)

Entre muchos otros, sobresale en China el primer reloj astronómico de Su Song[19] que se realiza en 1089, el cual posee mecanismos complejos, que deben mantenerse en buen estado para su buen funcionamiento(ChinaABC@, 2008).

A pesar de que probablemente no existen muchas evidencias físicas, sí las hay en manuscritos antiguos, se puede enunciar que en la cultura egipcia también se desarrollan mecanismos interesantes que contribuyeron a mejorar la calidad de vida en su época (Barajas, 2003); al igual en la cultura grecorromana, se dan importantes avances tecnológicos, por ejemplo en Grecia con grandes personalidades como Arquímedes[20], Euclides, Herón[21] [22]; los desarrollos griegos son el soporte de los avances romanos, entre sus estudios más connotados están los estudios de obras civiles y militares, por ejemplo Vitrubio[23] realiza análisis de arquitectura, para lo cual entrega bosquejos

Turriano construyó una máquina elevadora para abastecer de agua a Toledo, que obtenía energía de una rueda de paletas movida por el Tajo. Realizó también diversos relojes y autómatas, en particular uno de madera (el hombre de palo), que según la tradición acudía diariamente al palacio arzobispal a recoger la comida. Se le debe asimismo un molino automático en miniatura, en cuyo diseño colaboró personalmente Carlos V, que deseaba utilizarlo para la alimentación de las tropas. Se le debe una obra titulada " Los veinte y un libros de los ingenios y máquinas de Juanelo", verdadera enciclopedia de la mecánica del siglo XVI, que no se publicó en su tiempo, quizá porque fuese considerada secreto militar, y sólo recientemente ha salido a la luz (Turriano, 2008)

[19] La Dinastía Song data de la época de la historia antigua de China, en la que se hicieron una buena parte de los hallazgos de la ciencia y la tecnología. Fue en este período cuando se descubrieron y llevaron a la práctica tres de los cuatro inventos más importantes de la civilización china: la brújula, la imprenta y la pólvora negra. Hay que destacar que Bi Sheng inventó la imprenta 400 años antes que los europeos. Su Song construye el primer reloj astronómico del mundo(ChinaABC@, 2008).

[20] Arquímedes (287-212 AC), desarrolla la ley de la palanca, que da lugar a innumerables elementos, mecanismos, máquinas y utensilios civiles y de guerra; así mismo inventa la polea y desarrolla el concepto del tornillo sinfín, durante su estancia en Egipto. Es famoso Arquímedes, por el desarrollo de la catapulta y de sistemas incendiarios basados en espejos, que pone al servicio de los romanos (Barajas, 2003).

[21] Existen vestigios de elementos y sistemas automáticos hechos en el Renacimiento (Woodcroft, 1851)(Bautista, y otros, 2007).

[22] Considerado como el primer ingeniero debido a sus ilustraciones, bosquejos y explicaciones detalladas y exactas (Bautista, y otros, 2007).

[23] Marcus Vitruvius Pollio

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

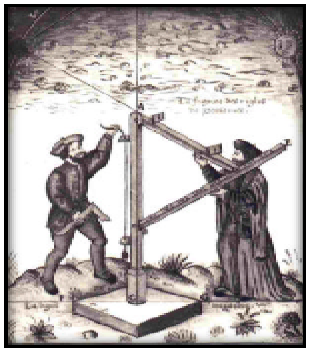
y explicaciones de las máquinas que usa en esta ciencia (Vitruvio, 2008).

Ilustración 2 - Reloj elefante de Al-Jazari, con mecanismos muy complejos.

En la era Medieval, el Islam se extiende profundamente durante la Edad Media y sirve de vehículo para dar a conocer los desarrollos técnicos de la cultura árabe. Se basan en la cultura grecorromana para ampliar sus aplicaciones y avanzarlas. Aparece el documento Mecanismos Ingeniosos en Bagdad, donde se esquematizan decenas de máquinas de diversas aplicaciones. Sobresale en esta cultura Al-Jazari[24] en el desarrollo de múltiples mecanismos de alta complejidad y avance para la época(Bautista, y otros, 2007). Los árabes contribuyen en gran medida a entender los movimientos de los cuerpos celestes, lo que sirve de base para avances en la ingeniería mecánica, con obras como las Tablas de Tolomeo.

Copérnico contribuye con algunos aportes en el campo de la astronomía, que son aumentados luego por Juan Kepler, quien formula las leyes de: los planetas desarrollan órbitas elípticas alrededor del sol, las líneas imaginarias que unen al sol con cada planeta recorren espacios iguales en el mismo tiempo y el tiempo empleado por un planeta para girar alrededor del sol es proporcional al cubo de su distancia al sol(Barajas, 2003).

Ilustración 3 - Observaciones del espacio celeste generan grandes avances en las leyes de la mecánica.



En el siglo XIII, Villard de Honnecourt, deja unos ensayos escritos sobre catapultas, máquinas, mecanismos, sierras y elevadores (de Honnecourt, 2001), como un ejemplo sobresaliente de que Europa avanza gradualmente hacia la era tecnológica del renacimiento (Bautista, y otros, 2007).

1.3.1.2.3 Renacimiento

Las máquinas adquieren gran difusión y avance en la era del Renacimiento[25] en la Europa Occidental, al dejar atrás la decadencia cultural de la Edad Media, sobresalen grandes desarrollos en la tecnología con protagonistas como: Galileo Galilei[26], Miguel Ángel, Leonardo de Vinci[27], Francisco di Giorgio, Agostino Ramelli, Geogius Agricola, Jacobus Strada, Guidobaldo del Monte, Isaac Newton[28], etc.; se dan grandes avances en la astronomía, la geografía mundial, la medicina, la pólvora, las armas bélicas, las embarcaciones, el descubrimiento de América, y muchos más que contribuyen eficazmente a los desarrollos actuales de máquinas, mecanismos y equipos(Renacimiento@, 2008).

Después del Renacimiento, el descubrimiento de nuevos territorios, permite la expansión y la creación de colonias europeas, que encuentran nuevos minerales y materias primas para su explotación, lo cual implica el desarrollo urgente de nuevos mecanismos y máquinas, lo cual permite un gran avance en la ingeniería mecánica, con autores como Juanelo (Turriano, 2008), Pedro Juan de Lastanosa (García, 1990), Jerónimo de Ayans y Beaumont, Francisco Lobato, etc. que aportan en gran medida, bases tecnológicas de ciertas aplicaciones empresariales en la futura Revolución Industrial de Inglaterra y otros territorios.

1.3.1.2.4 Revolución Industrial

Esta época acopia una gran cantidad de inventos, creaciones, bosquejos, mecanismos, máquinas, conocimientos, explicaciones, etc., para lograr un desenfrenado avance en la producción industrial; la creación de la máquina de vapor (Watt@, 2008), pone un punto de quiebre en el desarrollo de la ingeniería y es donde se logra aplicar el concepto que las máquinas no requieren del hombre para funcionar sino más bien que han de servirle a la

---

[24] *Conocido como el Robotista de la Edad Media. Al-Jazari, el robotista de la Edad Media. – Página web: http://www.neoteo.com/al-jazari-el-robotista-de-la-edad-media.neo Por: Ariel Palazzesi @ jueves, 03 de enero de 2008 - Aunque resulte difícil de creer, la robótica es una ciencia que tiene miles de años. ASIMO o los robots de Sony no son más que el resultado de siglos de investigaciones. Uno de los pioneros de esta ciencia fue el árabe Al-Jazari, uno de los más grandes ingenieros de la historia que construía autómatas en 1260. Citado por Bautista.*

[25] *Siglos XIV, XV y XVI.*

[26] *Galileo descubre la ley del péndulo, trabaja en principios de hidrostática, enuncia algunos principios y leyes sobre la caída de los cuerpos (que sirve de apoyo a la Ley de Gravitación Universal de Isaac Newton), entrega grandes avances en estática y leyes sobre los movimientos de los cuerpos (Bautista, y otros, 2007) (Barajas, 2003).*

[27] *Entre otros muchos desarrollos, logra grandes avances en acústica e ingeniería hidráulica (en Milán desde 1482 hasta 1497), hace importantes a la industria militar, en la anatomía trabaja sobre la circulación sanguínea y la órbita y funcionamiento del ojo, desarrolla el traje de buzo y algunos principios aerodinámicos, etc. (Barajas, 2003).*

[28] *La dinámica se apoya en algunas leyes del movimiento de Newton, con cuerpos con y sin aceleración, nace en 1642 y muere en 1727.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

humanidad para su bienestar y para mejorar su calidad de vida.

Surge en esta época un gran desarrollo en la ingeniería textil, empiezan acá los primeros vestigios de sistemas de producción en grandes volúmenes, nombres como Arkwright, Hargreaves y Cromptomn permiten hacer esto posible. Inglaterra es el primer país donde se implementan sistemas fabriles mecanizados y con algún grado de automatización, que permiten producir grandes cantidades de productos, mas no así en Francia que tiene un conflicto social interno(Bautista, y otros, 2007).

Posteriormente se dan más desarrollos que realizan personas como: Agustín de Betancourt y José Lanz (Bertancourt, y otros, 1802), M. Hachette, J. Weisbach, Labouale, F. Reaulaux, etc. que consolidan el gran avance de la ingeniería mecánica en la revolución industrial de la época y que se apoyan en los conocimientos desarrollados en épocas anteriores (Bautista, y otros, 2007).

Los grandes avances tecnológicos que se dan en la Revolución Industrial, como la máquina de vapor y otros desarrollos, sirven de base para el sistema empresarial moderno que desde el siglo XIX, XX y en el vigente, aprovechan ese cúmulo de conocimientos y otros más recientes como la masificación de la energía eléctrica para constituir los sistemas productivos de la actualidad.

En la Revolución industrial se logra la independencia de muchas naciones que buscan producir los bienes que importaban de territorios enemigos, lo que da pie al gran impulso empresarial de estos tiempos.

Los primeros trabajos de construcción en el siglo XVIII se les asignan a los ingenieros militares y los que no tenían este carácter militar se les entrega a los ingenieros civiles o de caminos en el mismo siglo. Con los grandes progresos y avances tecnológicos de las máquinas y los mecanismos en la Revolución industrial en el siglo XIX se logra independizar la ingeniería mecánica, de las otras áreas de la ingeniería. Y con el advenimiento de los grandes progresos de la ingeniería en el siglo XX se consolidan aún más las especializaciones de la ingeniería (Barajas, 2003).

1.3.1.2.5 Motores y máquinas de vapor

La máquina de vapor antes de constituirse como un invento práctico y fácil de masificarse, cuenta con grandes aportes graduales de diferentes desarrolladores como: Dennis Papin en 1690, el inglés Thomas Savery (1670-1715)(Savery@, 2008), Newcomen en 1717 y Watt(Watt@, 2008) (Barajas, 2003). La máquina de vapor revoluciona la industria metalúrgica en Inglaterra y luego en Francia, haciéndola crecer en volúmenes y producciones en economías de escala, inimaginables para la época. La máquina de vapor permite el rápido crecimiento de los sistemas mundiales de transporte y la expansión de los mercados globales. Existen algunos inventos derivados de la máquina de vapor como el martillo de vapor de los hermanos Scheider del Greuzot en 1841 y los hornos Siemens (Bautista, y otros, 2007). Los primeros sistemas de transporte masivo que usan la máquina de vapor, aparecen en el transporte fluvial (Barajas, 2003).

La fuerza motriz e industrial que se logra con los animales y/o el hombre para los sistemas de fabricación, se sustituye vertiginosamente con la aparición de la máquina de vapor, el automóvil y los motores de combustión interna. En 1771 Joseph Cugnot construye un vehículo tractor metálico autopropulsado, a partir de allí diversos constructores e inventores logran avances significativos en la fabricación de automóviles, sobresalen entre ellos William Murdoch, Richard Trevithick, Gurney, Hancock, Macerone, James Watt y William Symington de Inglaterra, Oliver Evans de Estados Unidos y otros (Automóvil@, 2008).

1.3.1.2.6 Motor de Combustión interna

Este invento, genera cambios radicales en los sistemas empresariales y de transporte masivo de personas y carga industrial, a pesar de que el holandés Christiaan Huygens[29] diseña un motor de combustión en 1678, solo hasta 1876 se consolida este invento, con August Otto (de origen alemán), con propulsión a gas, más adelante hacia 1887 Karl Benz y Gottlieb Daimler introducen eficaces automóviles a gasolina. Posteriormente la Peugeot se consolida como el primer fabricante masivo de automóviles en serie en 1891, otros fabricantes como Benz en

[29] *Christiaan Huygens, nace el 14 de abril de 1619 en La Haya (Holanda), se dedica a la astronomía, la física y las matemáticas, muere el 8 de julio de 1695, deja importantes obras en los temas que estudia y desarrolla.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Europa y Olds en Estados Unidos empiezan a consolidan la fabricación masiva de automóviles hacia 1900(Motor@, 2008).

La producción en serie de automóviles no es exactamente de Henry Ford, en 1798 Eli Whitney fabrica mosquetes en masa, como también en 1902 los vehículos Oldsmobile de Estados Unidos se fabrican en serie.

Entre 1913 y 1920 Ford se apuntala como un fabricante en masa de vehículos, con cadenas y sistemas organizados de producción y estandarización en sus partes y automóviles, al alcanzar volúmenes de producción de hasta dos millones de carros por año, hacia 1920 Canadá y estados Unidos hacen el 90% de la producción mundial de vehículos. Durante todo el siglo XX se expande la industria automotriz en todo el mundo y convierte junto el petróleo en dos puntales de la economía mundial (Barajas, 2003).

Es también relevante que desde el punto de vista termodinámico el ciclo de Otto es la base de partida de muchos equipos y procesos industriales de la actualidad; por otro lado en este desarrollo automotriz es pertinente enunciar a Rudolp Diesel (nace en 1858 y fallece en 1913, de origen alemán) quien aporta el motor Diesel, base de la industria del transporte marítimo, fluvial, terrestre, etc., en sistemas de grandes volúmenes de carga pesada en muchos países del mundo (Otto@, 2008) (Diesel@, 2008). A partir de estos desarrollos la termodinámica alcanza en los siglos XIX y XX grandes avances en diferentes ciclos como Brayton o Joule, Bomba de Calor, etc., para aplicaciones industriales en equipos de transporte y fabricación masiva.

1.3.1.2.7 Aviación

Por otro lado la aviación, también presenta en estos últimos siglos, avances interesantes, el monje inglés Roger Bacon en el siglo XIII, descubre que igual que el agua soporta un barco el aire podría soportar objetos, posteriormente Leonardo da Vinci[30] aporta algunos diseños que posteriormente sirvieron de base para la construcción de aeronaves, otros constructores y desarrolladores aportan nuevas ideas y aparatos aéreos, como: George Caley (de origen inglés) con sus planeadores, Francis Herbert Wenham con estudios serios de aerodinámica y del aire, hacia 1840 el inglés John Stringfellow y William S. Henson desarrollan algunos prototipos mejorados de aviones, los franceses Penaud en 1871 y Victor Tatin hacen modelos que logran volar por períodos y trayectos cortos, en 1891 un aparato que lo diseña Lawrence Hargrave vuela 95 metros, Pierpont Langley en 1896 vuela con un aeroplano casi los 1200 metros, el estadounidense Spaulding en 1889, el belga DeGroof en 1813, el austríaco Jacob Degen en 1806, Jean Marie Le Bris, John J. Montgomery, Percy Pilcher de Escocia, Octave Chanute de Estados Unidos en 1894 obtiene avances importantes con sus planeadores que los transcribe en su libro de avances aeronáuticos en 1894, el alemán Karl Jatho en 1903; por fin el 17 de diciembre de 1903 los hermanos Wright de Estados Unidos, en la ciudad Kitty Hawkn logran vuelos significativos bases del posterior desarrollo vertiginoso de la aviación con sus modelos Flyer, Flyer II y Flyer III, que paulatinamente alcanzan progresos hasta durar más de media hora en vuelo en una demostración que hacen en Francia en agosto de 1908 con su aeroplano de motor (Wright@, 2008) (Barajas, 2003).

La primera fábrica de aviones del mundo, de la que se tiene registro, es la de los hermanos Voisin en Francia (exactamente en París), uno de los aviones que se fabrican allí, el Levavasseur Antoinette (con un motor de 40 caballos de vapor), tripulado por el brasilero A. Santos D. en 1906 alcanza a recorrer 220 metros en 22.5 segundos, otro avión de la fábrica de los Voissin con el piloto Henri Farman, vuela más de dos minutos en 1907. En 1909 Orville (uno de los hermanos Wright) completa con un avión, los requisitos de vuelo del Cuerpo de Señales del Ejército de los Estados Unidos, lo que constituye el primer aeroplano operativo con funciones militares.

El desarrollo de la aviación, sigue su marcha en estos primeros años del siglo XX, son muchos los pilotos, constructores y desarrolladores que aportan avances simples o significativos a este proceso de la aviación, resaltan entre ellos: el estadounidense Glenn Hammond Curtiss quien vuela un dirigible de Thomas Baldwin en 1907 y cuatro años más tarde sirve de piloto al primer hidroavión, el francés Louis Blériot, Earle Ovington realiza en 1911 algunos vuelos en Estados Unidos con transporte de correo a bordo; durante la primera guerra mundial y en los años sucesivos, se logran grandes avances en las aeronaves y en los motores que las impulsan, durante esta primera guerra se construyen más aviones que en los últimos quince años, al igual se entrenan muchos pilotos; el

[30] *Entre sus deducciones más notales se encuentran el tornillo aéreo o hélice y el paracaídas.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

primer vuelo transcontinental lo realiza Calbraith P. Rodgers en 1911 y el primer trayecto aéreo transatlántico sin escalas se logra en 1919 con los británicos John William Alcock y Arthur Whitten Brown, en 1926 se crean varias compañías aéreas en América; en 1927 el estadounidense Charles A. Lindbergh cruza en solitario el océano Atlántico, la firma Pan American Airways es la compañía más grande del mundo al momento de iniciarse la segunda guerra mundial; otros personajes como Ben Kelsey, Roscoe Turner, Frank Hawks y Howard Hughes, realizan vuelos interesantes entre 1930 y 1940, que contribuyen al desarrollo de la aviación(Hughes@, 2008).

En 1944 los Estados Unidos alcanzan la cifra de 97694 aviones producidos, Alemania coloca dos nuevos aportes a la aviación mundial: motores a reacción para aviones y el primer proyectil volante y, en general durante la segunda guerra mundial se consiguen importantes avances de todo género en la navegación aérea. La aviación hacia 1986 logra el primer vuelo de una aeronave ligera alrededor del mundo sin escalas. Nacen en 1947 la OACI[31] y la IATA[32] como entidades reguladoras del transporte aéreo mundial, ambas con sede en Montreal (Canadá) (OACI@, 2008) (IATA@, 2008) (Barajas, 2003). En general, los desarrollos de mecanismos, máquinas, motores, aeronaves, sistemas automáticos, avances tecnológicos y demás áreas relacionadas con la aviación, alcanzan en la actualidad impresionantes avances tecnológicos, que hacen que los dispositivos, aparatos y equipos de aeronaves y de tierra de la aeronavegación, requieran de altos niveles de complejidad en mantenimiento, hoy en día.

1.3.1.2.8 Era espacial

Otra área que contribuye de manera impresionante al desarrollo de la ingeniería, de los mecanismos, de las máquinas y de todos sus artefactos relacionados, es la navegación espacial, importantes aportes se logran a través del vertiginoso crecimiento de la ciencia espacial tanto en el orden militar como científico, en este campo sobresalen diferentes protagonistas, tales como: Konstantin Eduardovish Tsiolkovskihacia (de origen ruso) finales del siglo XIX, con sus principios sobre las teorías de vuelos de cohetes y perspectivas de la navegación aeroespacial, el estadounidense Dr. Robert Goddard quien amplia la gama del conocimiento de cohetes y el comportamiento dinámico de naves en el espacio y lanza el primer cohete movido por combustible líquido en el mundo en 1926, otro desarrollo similar lo hace el alemán J. Winkler en 1931, el inventor alemán Max Valier, Hermann Oberth (de Rumania) quien alcanza importantes conceptos espaciales y en especial porque funda un grupo de científicos interesados en el campo de la navegación espacial, en dicho grupo están en 1927, entre otros: Johannes Winkler, Max Valier, Willy Ley, Hermann Oberth, Rudolf Nebel, Walter Hohmann, Guido Von Pirquet, Hoefft, K. Hainish, Klaus Riedel, Rolf Engel y Wernher von Braun; Alemania alcanza el vuelo controlado de cohetes con giroscopio en 1938 al inicio de la segunda guerra mundial, al final de esta última, ya Rusia y Estados Unidos contaban con avances tecnológicos que les permitía penetrar la atmósfera con cohetes sonda; una vez finaliza el conflicto global la mayoría de las tecnologías relacionadas con la navegación espacial se ubican en Estados Unidos, en Rusia, Francia y Gran Bretaña.

Rusia en 1957 ubica el primer satélite espacial en órbita, posteriormente Estados Unidos lanza el Explorer 1, nace en este momento la carrera espacial entre norteamericanos y rusos, la llegada del hombre a la luna y demás avances tecnológicos vertiginosos por parte de diferentes potencias entre finales del siglo XX e inicio del XXI, permiten grandes aportes a las máquinas y a los mecanismos, y por ende una necesidad creciente de avanzar en el mantenimiento de estos complejos equipos y sistemas.

Otros descubrimientos en el campo espacial y de otras ciencias como la físico ocurren en el siglo XX, que cambian radicalmente los conceptos de diseño, construcción y fabricación de máquinas, principios como los de Albert Einstein y muchos otros, exigen que el mantenimiento en la actualidad sea un campo científico complejo, amplio y profundo(EinsteinNASA@, 2008) (Barajas, 2003).

1.3.1.2.9 Época actual

Otras ciencias que se desarrollan a grandes velocidades es la metalurgia con materiales nuevos, con memoria, aleaciones y con materiales inteligentes, por un lado y, por el otro la nanotecnología, la electrónica, la cibernética, la automatización y las micromáquinas; en general el mundo actual tiene unos ritmos de crecimiento exponenciales, lo que obliga a las mantenedores de estos tiempos a manejar un espectro amplio y profundo de

[31] *OACI – International Civil Aviation Organization – Organización de la Aviación Civil Internacional*
[32] *IATA – International Air Transport Association – Asociación Internacional del Transporte Aéreo*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

conocimiento para logra mantener la funcionalidad confiable de los mecanismos y máquinas d producción.

Es indudable que este acelerado desarrollo de las máquinas, permite el tácito crecimiento del mantenimiento como el área encargada de que todos estos mecanismos, inventos y máquinas funcionen adecuadamente, a pesar de que la literatura poco menciona este campo, por deducción lógica se determina su existencia desde los tiempos más remotos.

1.4 Enfoques recientes de mantenimiento y de producción

Si se ubica el mantenimiento y la producción en una época contemporánea más reciente y si se desglosan sus procesos de evolución y crecimiento, de una forma mancomunada en las últimas décadas, se puede ensayar la siguiente clasificación, para comprender de una forma más clara: sus roles, sus relaciones y sus funciones, como se explican en los siguientes párrafos.

Ilustración 4 - Evolución histórica.

		Producción - Manufactura		Mantenimiento e Ingeniería de Fábricas	
Etapa	sucede aproximadamente	Orientación hacia	Necesidad específica	Orientación hacia	Objetivo que pretende
I	antes de 1950	el producto	generar el producto	hacer acciones correctivas	reparar fallos imprevistos
II	entre 1950 y 1959	la producción	estructurar un sistema productivo	aplicar acciones planeadas	prevenir, predecir y reparar fallos
III	entre 1960 y 1980	la productividad	optimizar la producción	establecer tácticas de mantenimiento	gestar y operar bajo un sistema organizado
IV	entre 1981 y 1995	la competitividad	mejorar índices mundiales	implementar una estrategia	medir costos, CMD, compararse, predecir índices, etc.
V	entre 1996 y 2003	la innovación tecnológica	hacer la producción ajustada a la demanda	desarrollar habilidades y competencias	aplicar ciencia y tecnología de punta
VI	desde 2004	Gestión y operación integral de activos en forma coordinada entre ambas dependencias Anticiparse a las necesidades de los equipos y de los clientes de mantenimientos - Predicciones - Pronósticos Gestión de activos			

(Mora, 2007a)

1.4.1 Enfoque hacia las acciones de mantenimiento, etapas I y II

Durante la etapa I aparecen los instrumentos de mantenimiento, en ese momento se contrata o se entrena el personal de mecánica, electricidad, mecatrónica, neumática, electrónica, etc., con el fin de capacitarlo para llevar a cabo las primeras acciones de mantenimiento, que son de índole correctiva (Rey, 1996)y que procuran corregir la falla o parada imprevista en forma prioritaria; en esta fase aparecen los elementos iniciales que se requieren para sostener los equipos tales como: órdenes de trabajo, herramientas, utensilios, almacenes de repuestos e insumos de mantenimiento, surgen las primeras informaciones que posteriormente se constituyen en las bases de datos y luego en el sistema de información, se desarrollan las técnicas y las tecnologías propias de la empresa en particular, etc.; en general se dan las bases para que el mantenimiento funcione. En la etapa I la prioridad del área de producción es elaborar productos o generar servicios.

Las fallas imprevistas se convierten en el mayor problema de la división de fabricación, pues impiden el desarrollo normal de su actividad, como consecuencia de esto sucede la aparición de la etapa II de mantenimiento, donde el objetivo principal es solucionar las paradas repentinas de los equipos, por lo cual mantenimiento empieza a desarrollar acciones de prevención o predicción de fallas, en esta fase empiezan a utilizarse técnicas y metodologías propias de las acciones planeadas[33] de mantenimiento, la empresa adquiere el conocimiento y la destreza para diferenciar las acciones propias de mantenimiento, antes y después de la falla; se inicia la utilización de técnicas y tecnologías propias de la prevención y predicción, tales como: rutinas de inspecciones, planes preventivos, mediciones técnicas, valoración de condición de estado de los equipos, ensayos no destructivos, registro de datos técnicos, monitoreo de equipos, reposición de elementos antes de que entren en estado de falla, control de la vida útil de los elementos, medición de la funcionalidad de los dispositivos, análisis de vibraciones, tribología, ajustes de función antes de la falla, etc. y, nace el control operativo de equipos y de sus

[33] *Las mismas que John Moubray denomina Tareas Proactivas (Moubray, 2004).*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

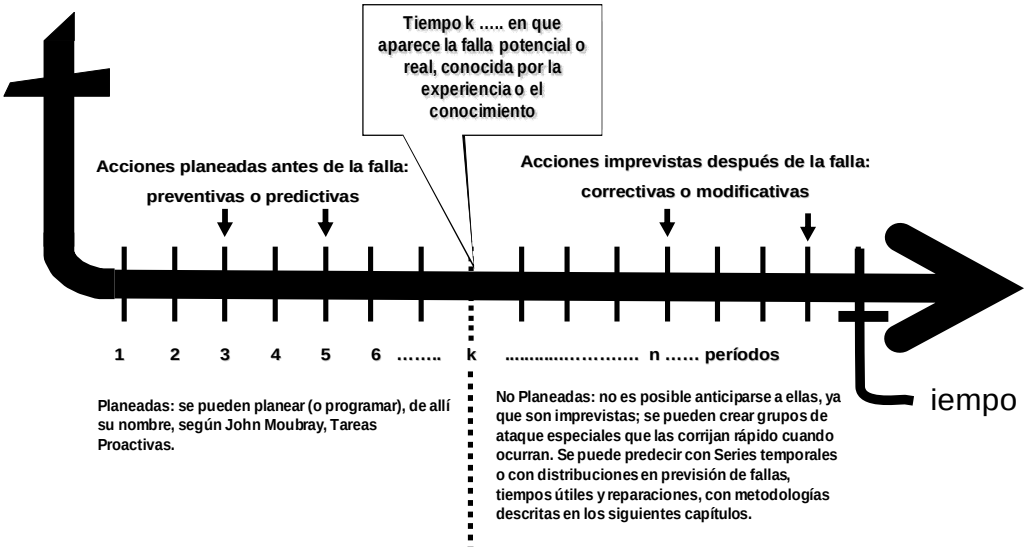
elementos. La etapa II permite la distinción entre las acciones correctivas, modificativas (rediseño) (Latino@, 1999a), preventivas (Idhammar, 1997a) (Idhammar@, 1999)(Latino, 1999b)(Patton, 1995) y predictivas (Latino@, 1999a) (Mora, 2007a)(Mora, 1990)(Navarro, y otros, 1997); siendo las dos primeras posteriores a la falla y las últimas, previas al estado de no funcionalidad del equipo (Mora, 2007b). En esta etapa solo se practica el mantenimiento correctivo o reparativo, las piezas y equipos se llevan al límite de su vida útil, hasta la falla y la recuperación de la función inicial, consiste en reemplazar la pieza que no funciona sin aplicar un mayor análisis sobre la causa raíz del problema (Benítez, 2007).

En esta etapa II se identifican los equipos, se determinan las tareas para las intervenciones planeadas o programadas (instrucción de mantenimiento), se definen las recomendaciones de seguridad, se establecen los planes de mantenimiento (programa maestro), se delimitan y se generan las OT[34] programadas (planeadas) y no programadas (no planeadas), se decide y se implementan los mecanismos de manejo y recolección de datos de una forma sencilla, completa y eficiente, que posteriormente se convierten en el sistema de información. También en esta fase se relacionan los equipos con los respectivos repuestos específicos y genéricos, a la vez que se concretan los parámetros de subcontratación y administración de proveedores.

La fase II también evalúa la conveniencia de implementar las técnicas de predicción por análisis de síntomas y por evaluación estadística, de acuerdo con la importancia y características de cada equipo en el proceso.

Para cada equipo fundamental de proceso se definen las acciones de mantenimiento más adecuadas y prioritarias, se preparan las rutas para recolectar datos (o mediciones), se identifican las máquinas a las que se les toman datos (con software propio o comercial), se fundamenta el sistema de gestión para recibir estas informaciones y generar las OT[35] apropiadas al proceso productivo(Mora, 1999).

Ilustración 5 - Acciones posibles de realizar antes o después de la falla (etapas I y/o II)



(Mora, 2007b)

1.4.2 Enfoque hacia la organización táctica de mantenimiento, etapa III

Una vez las empresas han alcanzado la madurez para el manejo real y conceptual de las acciones posibles de mantenimiento, empiezan a adoptar una estructura para el desarrollo secuencial, lógico y organizado del conjunto de acciones de mantenimiento que aplican; con el fin de gestar y operar el mantenimiento bajo un sistema organizado al adoptar en esta fase III una táctica[36] de mantenimiento, se destacan entre ellas: *TPM*[37]

[34] *OT -Órdenes de Trabajo, es importante resaltar que en este nivel o etapa de desarrollo se reciben órdenes de producción hacia mantenimiento lo cual pone en evidencia el grado de dependencia del segundo con el primero.*

[35] *OT – Órdenes de Trabajo*

[36] *Se define como conjunto de reglas para utilizar tropas en combate (Grijalbo, 2000), la Real Academia Española de la lengua la define como un método para ejecutar y conseguir algo, o la describe también como el arte que enseña a poner en orden las cosas (RAE@, 2008), llevado al argot de mantenimiento es el conjunto de reglas para desarrollar las actividades inherentes al mantenimiento de empresas de servicios y/o de procesos industriales, operando bajo un sistema lógico, ordenado y organizado.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(especialmente enfocada a mejorar la productividad)[38] (Roberts@, 2008)(TPM@, 2008), *RCM*[39] (Smith, 1992)(Moubray, 2004) (Smith, y otros, 2003), *TPM* & *RCM* combinados[40] (Moore@, 2001) (Geraghty, 1996) , *PMO*, Proactivo (Trujillo@, 1999b)(Trujillo@, 1999a) (Oiltech, 1995), (Pirret,1999,37)(Pirret@, 1999), Reactivo (Idhammar, 1997a) (Idhammar, 1997b)(Idhammar@, 1999) (Mora, 1999), *WCM*[41] (Hiatt, 2000), mantenimiento centrado en el riesgo (Tavares, y otros, 2005), centrado en objetivos o resultados (Tavares, y otros, 2005) (Williamson, 2008), *RCM* Scorecard[42] (RCMScorecard@, 2005) (Mather, 2005), *PMO*[43] (Turner@, 2007), mantenimiento centrado en habilidades y competencias (Mora, 2007a), etc., en orden secuencial e histórico. Es importante aclarar que no todas las empresas evolucionan históricamente al pasar por cada una de las tácticas(Táctica@, 2008) en forma secuencial, simplemente adoptan una propia que reúne las mejores prácticas de varias de ellas o toman una de ellas sin evolucionar en todas.

Lo importante en esta fase III para producción es maximizar la explotación y la combinación de sus factores productivos, en tanto que mantenimiento se constituye como una unidad independiente de producción, de apoyo logístico a operación y manufactura, dado que es normal que en las anteriores fases I y II, aún depende del área operativa, al referirse en cuanto a nivel jerárquico.

1.4.3 Enfoque integral logístico de creación de una estrategia de mantenimiento, etapa IV

La etapa IV se alcanza cuando las empresas desarrollan con suficiencia los niveles anteriores, en esta fase se interesan por medir resultados y pretenden saber qué tan bien hacen las cosas, es por eso que empiezan a establecer sistemas de costeo propios de mantenimiento como el *LCC* , implementan el registro histórico de fallas y reparaciones, se establecen sistemas de medición[44] bajo parámetros propios o internacionales, empiezan a interpretar y a utilizar la curva de Davies (o de la bañera) (Kelly, y otros, 1998) (Forcadas, 1983) al involucrar sus deducciones en las labores propias de mantenimiento (Ávila, 1992), se comparan con otras empresas similares o diferentes para establecer el nivel de éxito logrado tanto en operación como en mantenimiento y, en general procuran controlar todas las acciones realizadas.

En este nivel el área de producción pretende mejorar su competitividad y su mantenimiento, por lo cual establece las estrategias por medio de las cuales puede llegar a controlar en forma integral y específica todas las actividades, los elementos, las acciones, la táctica y todos los quehaceres de mantenimiento, consolidando de esta manera la función de mantener. En esta etapa IV el resultado de aplicar el conjunto de gestiones y acciones de las etapas anteriores de una forma logística (Ballou, 2004) (Árbones, 1999), conduce a la Terotecnología también conocida como mantenimiento integral logístico.

La Terotecnología se apoya en varias ciencias y en diversas áreas del conocimiento como: la logística, la administración, las finanzas, las necesidades, los deseos y los requerimientos del usuario, la ingeniería, las características del diseño, los costos de fabricación y sostenimiento[45] de equipos, los ciclos de vida de los equipos y de la tecnología, la construcción, etc.; en especial utiliza la logística, la ingeniería de fábricas y la gestión de tecnología (Dounce, 1998), a partir de que la competitividad se sustituye como parámetro primordial en los negocios por la innovación tecnológica (Etapa V)(Mora, 1999)(Dounce, 1998)(Kelly, y otros, 1998) (Husband, 1976)(Darnell, y otros, 1975) (Rey, 1996).

En este nivel IV se involucran los directivos y todas las demás áreas corporativas de la empresa en un solo

[37] *TPM Total Productive Maintenance – TPM Manejo y Mantenimiento Productivo Total*

[38] *La gestión del TPM se ubica mucho al interior de las organizaciones, basándose en su definición de productividad – Productividad: término que se refiere al cociente entre la producción y los factores (la producción total dividida por la cantidad de trabajo es la productividad del trabajo, la cual aumenta con mejoras tecnológicas, con incremento de la calidad del trabajo o con el crecimiento de la intensificación del capital) (Samuelson, y otros, 1996). En términos de los resultados económicos de un país a largo plazo, se establecen dos determinantes: la inversión para acelerar el crecimiento y el ritmo de avance tecnológico; el índice preciso del cambio tecnológico es la productividad total de los factores, que mide la producción total por unidad de todos los factores (Samuelson, y otros, 1996). Rendimiento de una actividad productiva, expresada en cantidad de producción obtenida por unidad de factor (Grijalbo, 2000).*

[39] *RCM - Reliability Centered Maintenance, en castellano Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad MCC.*

[40] *Combinado, se le denomina a la utilización conjunta de las mejores prácticas de TPM y RCM, utilizadas en forma simultánea.*

[41] *WCM - World Class Maintenance – Mantenimiento de Clase Mundial, muy recomendada para empresas que exportan una parte significativa de sus bienes o servicios.*

[42] *RCM Scorecard - Jack Nicolas Jr., construye un sistema de mantenimiento centrado en confiabilidad a partir de los tableros de mando de control Balanced Scorecard de Kaplan y Norton, basado en los trabajos originales de RCM de Nowlan y Heap, de RCM SAE JA 1011 y 1012 y de los trabajos de Mac Smith, con la colaboración de Doug Plucknette, con el fin de poder medir resultados de esta táctica.*

[43] *Táctica reciente de PMO – Planned Maintenance Optimization – Optimización del mantenimiento Planeado.*

[44] *CMD - Confiabilidad – Mantenibilidad – Disponibilidad; en inglés RAM - Reliability Availability Maintainability que corresponden en orden a Confiabilidad Disponibilidad Mantenibilidad.*

[45] *Término equivalente a mantenimiento.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

objetivo para obtener la mayor eficiencia productiva y la máxima reducción de costos. En este sistema se establecen metas alcanzables a todas las áreas involucradas, además de detectar las necesidades reales de desarrollo de personal y capacitación con el fin de que los miembros del área de mantenimiento alcancen niveles adecuados de calificación para aplicar nuevas tecnologías en procesos de gestión.
Históricamente se demuestra que las empresas después de alcanzar el nivel IV, regresan a las fases anteriores para profundizar en algún tópico especial de cualquiera de los primeros tres niveles.

1.4.4 Enfoque hacia las habilidades y competencias de mantenimiento, etapa V

La etapa V se caracteriza por procurar el desarrollo de habilidades y competencias (*Cord Competences*[46]) en todo su personal, también profundizan en alguna de las etapas anteriores, en este nivel se consolidan las realizaciones de *FMECA*[47], *RCFA*[48] y *RPN*[49] (Babylon@, 2008) y, en general la empresa se fortalece en el desarrollo de habilidades y competencias en todos o en algunos de los tópicos iniciados en las etapas anteriores. En esta fase V se logra la consolidación del sistema de información de mantenimiento y producción.

Es probable también que se realice una estrategia de mantenimiento integral basada en procesos, donde se analizan las actividades, los procesos y el macro-proceso de mantenimiento, mediante la implementación de índices e indicadores sobre la calidad, el tiempo y los costos de cada acción de mantenimiento, al identificar el cliente y el demandante de cada tarea, a la vez que se deben medir todos los parámetros de proceso; ya sea por el método de *Vital Signs - Performance* (Signos Vitales del *Quantum Performance*) (Hronec, 1995) donde se establece un control total, detallado e interrelacionado del sistema de mantenimiento en tiempo real, con participación de todos los empleados y trabajadores de la empresa (Mora, 2007a)o últimamente se trabaja también con *Balanced ScoreCard*[50] (Cuadros y Tableros de Control) (Kaplan, y otros, 1997) aplicado a mantenimiento (RCMScorecard@, 2005) bajo direccionamiento estratégico (Steiner, 1985) . Durante la etapa V también se propende la utilización de la teoría de restricciones *TOC* y de los costos basados en actividad ABC (Mora, 2007a) en este nivel de desarrollo (González, 2004).

Por otro lado, producción implementa técnicas y tecnologías de punta como *lean production* o producción ajustada a la demanda, manejo de inventarios, ABC de inventarios, sistemas de control, justo a tiempo, APC[51], *CPFR*[52], pronósticos de demanda, *business forecasting*[53], sistemas de simulación, MRPII, etc. (Sherwin, y otros, 1995) y todas aquellas mejores prácticas que aumenten la productividad, la rentabilidad, la competitividad, la utilización de innovación tecnológica; todo con base en una producción ajustada a la demanda requerida.

En este momento de la evolución en el tiempo y cuando las organizaciones pasan por las etapas descritas anteriormente, las empresas alcanzan tal grado de conocimiento, experiencia, desarrollo de tecnologías propias y dominio de modernas técnicas de mantenimiento y producción; que empiezan estas dos áreas a trabajar en forma conjunta y alineada por encima de cualquier obstáculo propio, en aras de optimizar el bien común que las relaciona, la máquina (o aparato productivo) al dejar de mirarla como un pasivo que hay que utilizar para producir y mantenerlo para que se pueda utilizar, a entenderlo como un activo que genera ingresos para la organización.

1.4.5 Enfoque hacia la gestión de activos, etapa VI

Se puede afirmar que cuando la organización desarrolla y alcanza una metodología capaz de integrar todos y cada uno de los niveles anteriores se alcanza la etapa VI, definida como gestión de activos, la cual permite integrar todo el conocimiento y las mejores prácticas aprendidas, con el fin de manejar con flexibilidad y éxito sus activos (parque industrial, equipos, etc.).

---

[46] *Cord Competences – Habilidades y Competencias.*
[47] *FMECA - Failure Mode, Effects Causes and Criticality Analysis – Análisis de los Modos, los Efectos, las Causas y las Criticidades de las Fallas.*
[48] *RCFA - Root Cause Failure Analysis – Análisis de la Causa Raíz de las Fallas.*
[49] *RPN - Risk Priority Number – Número de Riesgo Prioritario.*
[50] *El método de Signos Vitales inicia desde la base operativa y asciende a los niveles más altos de la organización trabajando bajo el método de planeación estratégica, mientras que el de Tableros de Control trabaja los niveles superiores de la organización bajo un enfoque de dirección estratégica. En los procesos de direccionamiento estratégico sólo participan Funcionarios de la Alta Dirección de la empresa (Steiner, 1985) y en los de planeación estratégica toda la organización con sus nexos externos.*
[51] *APC - Administración Por Categorías, metodología integral de clientes proveedores y productores.*
[52] *CPFR - Collaborative Planning Forecasting and Replenishment (CPFR@, 2008), es un proceso colaborativo de todos los actores de la cadena productiva y de servicios, que pronostican, planean y se reabastecen en forma integral y mancomunada bajo un proceso de administración conjunta.*
[53] *Business Forecasting, su traducción es aproximadamente la planeación comercial basada en pronósticos de demanda.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

1.4.5.1 Activos y Pasivos

La diferencia entre activo y pasivo es que conceptualmente el primero de ellos se asocia a la producción de riqueza, mientras que el segundo se refiere a inversión o gasto (Kiyosaki, y otros, 2000). Bajo esta premisa se influye el mantenimiento en cuanto a la forma de visualizar la utilización de los activos. Se entiende el ingreso como el flujo nominal producto de una actividad o comercialización de bien o servicio que recibe una empresa o familia; mientras que el gasto es lo que una institución, familia u objeto requiere para ser mantenido.

La transformación empresarial para alcanzar el nivel de gestión de activos requiere entre otras, que todas las acciones del mantenimiento y producción generen aumento de la capacidad de producción, del valor agregado y de su demanda; al tratar de conquistar cada día más el mercado potencial, de lo contrario aún se está en una actitud pasiva, opuesta a la presentada en este numeral, que incurre nuevamente en gastos en el manejo de sus equipos.

La evolución hacia la etapa VI de gestión de activos presenta diferentes y diversas formas de ser alcanzada, entre las más relevantes, sobresalen: la inversión en I&D[54] procurando disminuir los tiempos de reparación y los de mantenimientos planeados, los cuales se manifiestan con una reducción tangible de los tiempos (correctivos, modificativos, preventivos, predictivos, de espera o demora de recursos) que impiden la función principal de los equipos, como *DT*[55], *MTTR*[56], $\overline{M}$ [57] o con un aumento significativo de los tiempos útiles *MTBM*[58], $MTBM_C$[59], $MTBM_P$ [60] (véase el significado de cada sigla en el siguiente capítulo), lo que a su vez redunda en: costos más bajos, menor requerimiento de capital de trabajo, esto se realiza bajo el enfoque de rediseño de procesos al estudiar en forma detallada las acciones de mantenimiento o mediante el análisis de los trabajos de mantenimiento (Mora, 2007a), ya sea mediante la evaluación estadística de la información o al desarrollar el conocimiento científico pertinente para mejorar las actividades de reparación o intervención de mantenimiento; la mejora de los índices CMD se alcanza mediante proyectos y, en especial con todos aquellos estudios y acciones que conduzcan al aumento de la disponibilidad y del engrandecimiento del tiempo operacional sin fallas o sin reparaciones, medido a través de los índices CMD, *UT*[61], *MTBF* (Tiempo Medio Entre Fallas), *MTTF*[62] y en fin con todas aquellas actividades que propendan el aumento de la confiabilidad (probabilidad de que los equipos operen el mayor tiempo posible sin fallas o reparaciones) y de la mejora de la mantenibilidad (probabilidad de que un equipo que ha estado operando, y que por ende ha sufrido cierto desgaste y/o pérdida parcial o total de su funcionalidad y/o cierto ajuste, pueda ser restituido a su condición de referencia o trabajo) (Mora, 2007b) (Ávila, 1992).

Se puede contribuir con el aumento de la mejora de la confiabilidad mediante el incremento de la demanda y del mercado real y potencial con el fin de aumentar el *UT* (Tiempo Útil de funcionamiento al requerir más producción, o mediante la utilización del *Ready Time*[63] (tiempo en que la máquina está disponible, con el estado de funcionalidad correcto, pero no produce), con lo cual se acrecienta la disponibilidad (se debe recordar que la disponibilidad es el resultado de un cálculo numérico que se obtiene a partir de la confiabilidad y de la mantenibilidad, bajo estándares internacionales (en el siguiente capítulo, se amplía el tratamiento de las diferentes disponibilidades: genérica, inherente, alcanzada, operativa y operativa generalizada)); al eliminar inversiones en procesos que no son estratégicos y que no generen utilidades que compensen la inversión de capital, al mejorar la gestión de inventarios y el manejo de repuestos e insumos para mantenimiento y producción; como la

---

[54] *I&D - Investigación y Desarrollo en Ingeniería.*

[55] *DT Down Time, es el tiempo en que el equipo dura detenido y coincide con el tiempo de reparación, este término se usa cuando la Disponibilidad utilizada para el cálculo CMD (Confiabilidad Mantenibilidad Disponibilidad) es la genérica = UT / (DT + UT), siendo UT Up Time o Tiempo Útil.*

[56] *MTTR Mean Time To Repair - Tiempo Medio entre Reparaciones, este concepto se usa cuando la Disponibilidad utilizada es la Inherente donde D_I=MTBF / (MTBF + MTTR), donde MTBF es el tiempo medio entre fallas – MTBF – Mean Time Between Failures.*

[57] *$\overline{M}$, Mean Time active Maintenance – Es el Tiempo promedio que toma cualquier tipo de tarea (planeada o no) de Mantenimiento en el equipo. Se usa cuando se utiliza para el cálculo CMD la Disponibilidad Alcanzada, Operacional u Operacional generalizada.*

[58] *MTBM, Mean Time Between Maintenance, este concepto se usa cuando se utiliza para el cálculo CMD la Disponibilidad Alcanzada, Operacional u Operacional Generalizada y, significa el Tiempo Útil promedio de la máquina o sistema entre dos actividades de mantenimiento (planeadas o no), es el tiempo promedio que dura la máquina funcionando correctamente, entre dos tareas de mantenimiento.*

[59] *$MTBM_C$ – Tiempo Medio Útil entre Mantenimientos Correctivos*

[60] *$MTBM_P$ - Tiempo Medio Útil entre dos Mantenimientos Planeados (sea preventivos o predictivos, o combinados).*

[61] *UT - Up Time o Tiempo Útil.*

[62] *MTTF – Mean Time To Failures – Tiempo medio para Fallar, se utiliza este solo la primera vez del cálculo en los elementos de mantenimiento reparables, o en los ítems no mantenibles. Por otro lado UT, DT, MTBF, MTTR, MTTF, etc., son indicadores CMD que se usan en las Disponibilidades Genérica e Inherente (Intrínseca) y los índices de tiempo de espera o demora LDT, ADT, LDT' se utilizan en las Disponibilidades Alcanzada, Operacional y Operacional Generalizada.*

[63] *Ready Time, denota que la máquina funciona correctamente, pero no produce volúmenes significativos de unidades. También cuando opera el equipo al mínimo posible. Se utiliza este indicador solo en la Disponibilidad Operacional Generalizada.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

preservación de los mismos; los procedimientos de adquisición de elementos necesarios para el mantenimiento, como de manejo de proveedores, entregas oportunas de materiales y tiempos de servicio.

En síntesis se mejora la disponibilidad[64], mediante la eliminación de fallas, con la reducción de los tiempos de reparación y mantenimientos planeados, por razón de incrementar los tiempos entre mantenimientos planeados (pero con una vigilancia muy estricta del βeta (se le conoce como el factor de Forma (en que los equipos fallan), se explica en capítulo siguiente) y con el monitoreo permanente de la máquina para que no aparezcan fallas que ya se controlan desde antes de ampliar los períodos entre mantenimientos preventivos y/o predictivos), o también al eliminar o disminuir los tiempos logísticos requeridos para mantenimiento y/o producción.

1.4.5.2 De gestión de pasivos a gestión de activos

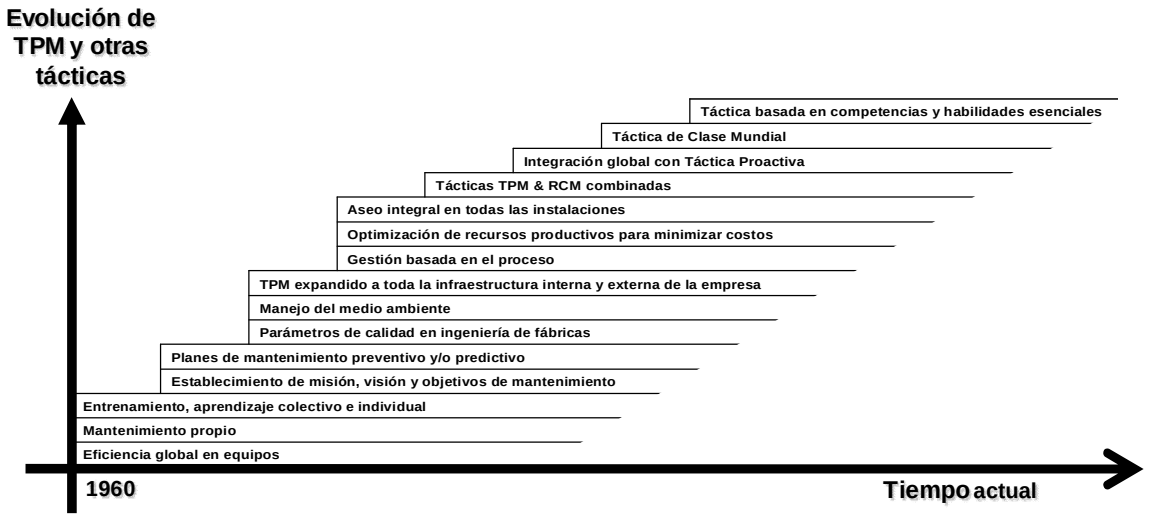
Entre los diferentes hechos que permiten la orientación de las empresas hacia la gestión de activos, aparecen varios acontecimientos como relevantes, que se explican en los párrafos sucesivos.

Los inicios se marcan por acciones de mantenimiento de tipo correctivo que generan gastos y actúan de forma pasiva; posteriormente se pasa a evitar fallas y paradas imprevistas en los equipos mediante acciones de tipo preventivo, gobernadas básicamente por períodos de tiempo para los recambios, las reposiciones o cambio de repuestos, o en su defecto por el número de productos generados o por algún indicador del volumen de bienes producidos; criterios con los cuales se determina una parada general de la máquina donde se realiza una inspección general y se desarrollan diferentes actividades como: limpieza, ajustes y reparaciones, todo esto se realiza en aquella época inicial, a partir de la experiencia y/o de las recomendaciones de los fabricantes.

A mediados del siglo pasado empiezan a aparecer otras formas de organización del mantenimiento, donde simplemente, no solo importa la acción propia del mantenimiento, sino la estructura organizacional para hacerlo, aparecen las tácticas de mantenimiento productivo, como el mantenimiento centrado en la confiabilidad y otras donde lo importante es la organización y la planeación. A nivel mundial, aparece el concepto de que mantenimiento ya no depende de producción, sino que se establece como una unidad independiente, al dejar de ser un departamento gestor de pasivos y generador de gastos.

La aparición del *TPM*, el cual integra el personal de producción hacia la actividad del mantenimiento, para procurar una mejor productividad; marca un hito en la aparición de tácticas, que luego evolucionan hacia el *RCM*, combinado, Proactivo, Reactivo, clase mundial, centrado en objetivos, *PMO* y, muchas otras que se desarrollan en tiempos recientes hasta las últimas como el *RCM Scorecard.*

Ilustración 6 - Evolución del TPM en el tiempo



(Mora, 2007b)

[64] *Disponibilidad = Confiabilidad / (Confiabilidad + Mantenibilidad) (Mora, 2007a).*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

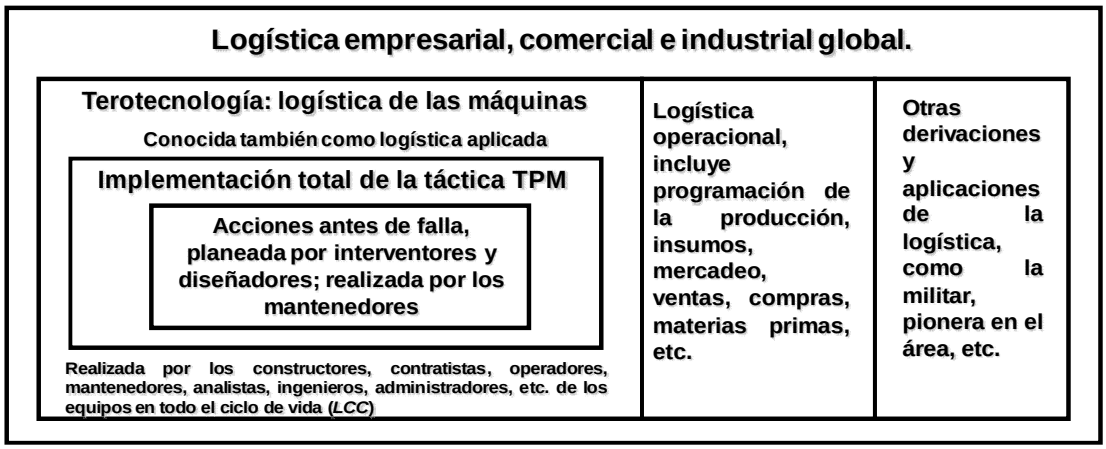
Los japoneses integran los conceptos desarrollados anteriormente y los asocian a la necesidad de ocupar el tiempo ocioso del profesional de operación con actividades sencillas y bien definidas de mantenimiento, lo que deja un tiempo disponible a los profesionales de mantenimiento, para realizar tareas de análisis y desarrollo de ingeniería de mantenimiento, que permiten revaluar proyectos de los equipos, instalaciones, así como los métodos y procesos adoptados. Uno de los grandes aportes del *TPM*, es que da las bases para el desarrollo táctico de mantenimiento; es reconocida como la más antigua y básica de las tácticas de mantenimiento, el *TPM* posee normas, con reglas, usos, costumbres y pilares bien definidos.

1.4.5.2.1 La Terotecnología

En 1976, los autores M. Husband y Dennis Parkes de Inglaterra, desarrollan un concepto integrador que revoluciona la gestión y la operación de mantenimiento, la Terotecnología[65], concepción que involucra los costos en la gestión de mantenimiento bajo la orientación del *LCC*, el término denota la integración de todos los esfuerzos de las etapas de fabricación, producción, explotación, mantenimiento y operación integral de los equipos, para optimizar los rendimientos mediante un excelente mantenimiento bajo un enfoque de costos (Husband, 1976)(Rey, 1996). Se puede explicar, deducir y sustentar del documento de Parkes, que los índices de rendimientos son la confiabilidad, la mantenibilidad, la disponibilidad y los costos asociados a mantenimiento.

La Terotecnología (palabra proveniente de las raíces griegas: thero: cuidado; techno: técnica y logos: tratado)[66] plantea el cuidado integral de la tecnología y su propósito es plantear las bases y reglas para la creación de un modelo de la gestión y operación de mantenimiento orientada por la técnica y la logística integral de los equipos (Terotecnología) (Kelly, y otros, 1998) (Rey, 1996).

Ilustración 7 - Relación entre TPM y Terotecnología



(Mora, 2007a)

En el artículo "Tomando decisiones en la administración del mantenimiento", los autores Pintelon y otro (1991) plantean que si bien la Terotecnología se concibe en los años setenta como una decisión gubernamental de la Gran Bretaña, estos conceptos no se han difundido en la industria a nivel mundial, debido a la poca disponibilidad de metodologías prácticas para soportarlo. Aunque en los Estados Unidos se utiliza el concepto de ciclo de vida, éste se tiene en cuenta al inicio (Blanchard, 1995) y en la evolución de la Terotecnología, recientemente ha recobrado importancia, debido a las exigentes condiciones de competitividad requeridas a las empresas y a las nuevas herramientas de información disponibles.

La Terotecnología está relacionada con la especificación y el diseño para la confiabilidad y mantenibilidad de equipos, maquinaria, edificios y estructuras; se asocia también: a la puesta en marcha de máquinas, al mantenimiento, a las modificaciones, a las reformas, a las ampliaciones y al reemplazo de los equipos; así como a la retroalimentación de información sobre el diseño, desempeño y costos de maquinaria.

---

[65] *En inglés terotechnology.*
[66] *Tomado del diccionario informático Encarta. Rey Sacristán la traduce como "cuidar la tecnología".*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Esto significa que debe tenerse una visión global de la administración de los activos físicos, definiéndose de esta forma la Terotecnología, como una de las bases más influyentes en la actual gestión de activos. Si las inversiones en mantenimiento de un equipo, son anualmente un 15% de su valor de compra, en siete años superan su costo inicial(White, 1975). Las tendencias y perspectivas mundiales de la gestión de mantenimiento (Thorsteinsson, y otros, 1997) orientadas por la Terotecnología, señalan a la norma británica 3811, como el parámetro base y fundamental de la gestión de activos, a la vez que la definen a esta norma, como epicentro de la Terotecnología.

Los ingleses definen en esta norma a mantenimiento como "la combinación de todas las técnicas y actividades administrativas asociadas, que intentan retener y conservar el estado original de los equipos en que fueron diseñados y para lo cual se requieren"[67], la tendencia es que mantenimiento llegue a adquirir la dimensión de una estrategia corporativa de aplicación mundial, que permita sistemas justo a tiempo en producción, que conduzca a una manufactura ágil, que conlleve a alta confiabilidad en los equipos, que labore bajo el concepto de servicio al cliente, en los momentos oportunos con la mayor disponibilidad (y mantenibilidad) posible y que permita precios de servicios de mantenimiento competitivos (Mora, 1998a). Cabe anotar que este párrafo y sus enunciados enmarcan la Terotecnología como la estrategia marco y macro de mantenimiento, caracterizada en la etapa IV del desarrollo que se muestra en las secciones anteriores.

La Terotecnología es una alternativa técnica capaz de combinar los medios financieros, estudios de confiabilidad, evaluaciones técnico-económicas y métodos de gestión para obtener ciclos de vida de los equipos cada vez menos dispendiosos y costosos. Por ser un órgano que relaciona directamente a proveedores, usuarios, diseñadores, oferentes y demandantes de insumos, parece lógico afirmar que la Terotecnología es centro vital del mantenimiento.

A partir de 1980, con el desarrollo de los ordenadores[68] personales, de uso masivo a costos reducidos y lenguajes sencillos, los órganos de mantenimiento pasan a desarrollar y usar sus propios programas, lo que elimina los inconvenientes de dependencia de disponibilidad humana y de equipos para atender sus prioridades de procesamiento de información a través de un computador central institucional; además de las dificultades de comunicación en la transmisión de sus necesidades para el analista de sistemas, que no siempre está familiarizado con el área de mantenimiento.

Para complementar esto surge una metodología inglesa[69] para auditar el área de mantenimiento, la cual permite evaluar de una forma integral y detallada casi todas los parámetros empresariales de mantenimiento; al evaluar diferentes tópicos de mantenimiento mediante aproximadamente 650 preguntas que miden doce componentes básicos de mantenimiento, sus resultados se entregan en forma numérica y de radar; las personas que participan son funcionarios de mediano y alto rango de las áreas de producción, mantenimiento y gerencia de planta (Mora, 2007b).

El análisis y diagnóstico consiste en formar un grupo de trabajo interdisciplinario, que es asesorado o no por consultores externos, para evaluar la situación actual de los distintos aspectos de la gestión y operación del mantenimiento, es coordinado por el director de ingeniería de fábricas[70] - IF, debe conformarse con representantes de todas las áreas relacionadas con mantenimiento como: materiales, producción, suministros, compras, proyectos, finanzas, contabilidad, sistemas, inventarios, almacenes, desarrollo de personal, nómina, recursos humanos, investigación y desarrollo, sistemas, departamento jurídico de contratos, activos, etc., con reuniones permanentes y periódicas donde se revisan las evaluaciones, metas, logros y reconsideraciones.

El mayor nivel de servicio exigido en la calidad de los bienes y servicios producidos, en la década de los ochenta por parte de los consumidores ayuda al mejor posicionamiento de mantenimiento, tanto así que en 1993 este reconocimiento es aceptado en la norma ISO 9000 cuando se incluye la función mantenimiento en el proceso de certificación, al dar a mantenimiento el mismo nivel en la organización que el de operación (hecho ya identificado por ONU en 1995(Tavares, y otros, 2005)) en la búsqueda de optimizar la calidad, la confiabilidad operacional, los costos de producción (o servicio), la oportunidad, la garantía de seguridad del trabajo y de la preservación del medio ambiente.

---

[67] *Norma 3811 de la Asociación Británica de Normas Técnicas - British Standard de 1984.*
[68] *Ordenador, también se usa el término computador, sobre todo en algunos países de América Latina.*
[69] *Flash Audit System (véase en sección más adelante).*
[70] *IF – Ingeniería de Fábricas, término que se usa para denotar un área global de la empresa que incluye las divisiones de mantenimiento, proyectos, producción, calidad y otras afines.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 8 - Programa Flash Audit inglés, para el análisis y diagnóstico de mantenimiento

FLASH AUDIT

Compañía		**País:**	
Address	Dirección física		
	Ciudad		
	Código Área	Apartado Aéreo	
	Estado o Provincia		
	Email o Web		
	Teléfono	Fax	

Maintenance Manager					
Coordinador	Nombres y Apellidos	Function	Grado Académico	Edad	Años en la empresa

Participantes	Nombre Apellidos	Cargo	Grado Académico	Edad	Años en la empresa	
○ 1. Director Ingeniería						
○ 2. Funcionario de Producción						
◉ 3. Funcionario de Mantenimiento						
○ 4.Muestra resultados						

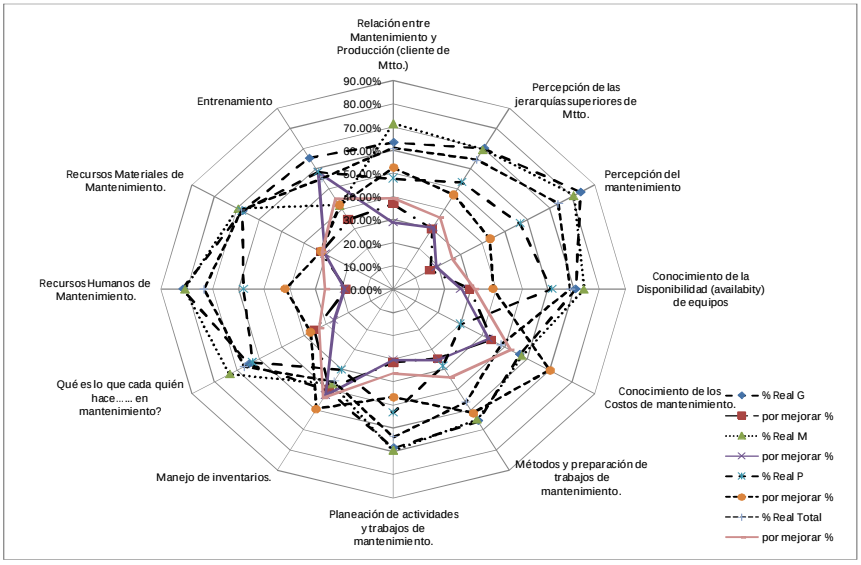
Fecha: Año - Mes - Día:

Ilustración 9 - Objetivos del mejoramiento del programa Flash Audit y áreas que cubre

Flash Audit Mejoramiento		Gerentes		Mantenimiento		Producción		Total	
No.	Concepto	% Real G	por mejorar %	% Real M	por mejorar %	% Real P	por mejorar %	% Real Total	por mejorar %
1	Relación entre Mantenimiento y Producción (cliente de Mtto.)	63.24%	36.76%	71.32%	28.68%	47.79%	52.21%	60.78%	39.22%
2	Percepción de las jerarquías superiores de Mtto.	70.16%	29.84%	69.35%	30.65%	53.23%	46.77%	64.25%	35.75%
3	Percepción del mantenimiento	83.65%	16.35%	80.77%	19.23%	56.73%	43.27%	73.72%	26.28%
4	Conocimiento de la Disponibilidad (availabity) de equipos	70.45%	29.55%	73.86%	26.14%	61.36%	38.64%	68.56%	31.44%
5	Conocimiento de los Costos de mantenimiento.	56.25%	43.75%	57.50%	42.50%	30.00%	70.00%	47.92%	52.08%
6	Métodos y preparación de trabajos de mantenimiento.	65.53%	34.47%	64.77%	35.23%	38.26%	61.74%	56.19%	43.81%
7	Planeación de actividades y trabajos de mantenimiento.	68.48%	31.52%	69.57%	30.43%	53.26%	46.74%	63.77%	36.23%
8	Manejo de inventarios.	50.45%	49.55%	47.32%	52.68%	40.18%	59.82%	45.98%	54.02%
9	Qué es lo que cada quién hace..... en mantenimiento?	64.66%	35.34%	73.28%	26.72%	62.93%	37.07%	66.95%	33.05%
10	Recursos Humanos de Mantenimiento.	81.62%	18.38%	80.88%	19.12%	58.09%	41.91%	73.53%	26.47%
11	Recursos Materiales de Mantenimiento.	67.59%	32.41%	69.44%	30.56%	67.59%	32.41%	68.21%	31.79%
12	Entrenamiento	65.28%	34.72%	41.67%	58.33%	58.33%	41.67%	55.09%	44.91%
						Promedio		62.08%	37.92%

Los valores relevantes a mejorar están por encima de la media.

Ilustración 10 - Radar del mantenimiento de Flash Audit y áreas que cubre

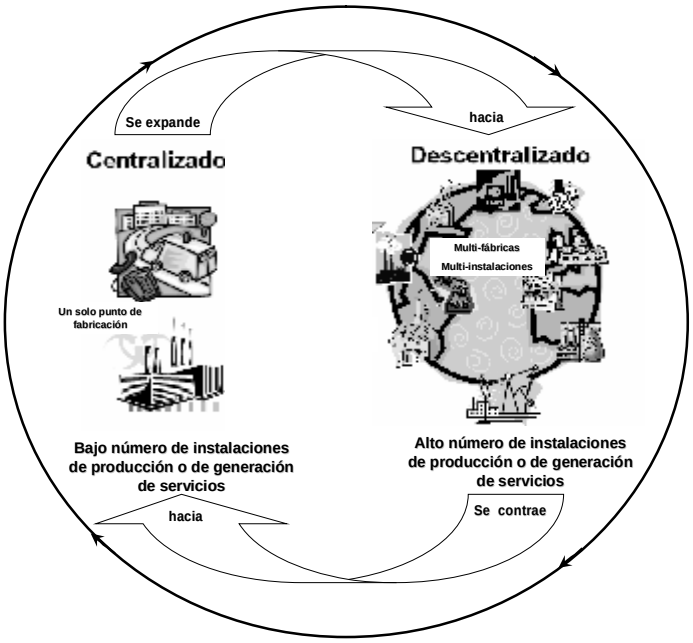


PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

1.4.5.2.2 La evolución organizacional y estructural de mantenimiento.

La forma en que interactúan mantenimiento y producción, dentro de un esquema de ingeniería de fábricas - IF - o de ingeniería de confiabilidad en un sistema empresarial, puede aportar muchas clasificaciones, todo depende del punto de vista que se tome, entre otras el autor presenta algunas. Inicialmente, se puede mencionar que el mantenimiento puede ser centralizado, descentralizado y mixto.

Ilustración 11 - Opciones de estructuras organizacionales de mantenimiento



En el centralizado el área de mantenimiento se encuentra en el mismo nivel jerárquico de la operación, este tipo de gestión puede darse en empresas medianas y pequeñas donde es un requerimiento para un mejor control, se puede asociar a organizaciones en crecimiento que consolidan una estructura característica de las etapas III y IV de la evolución de mantenimiento; se puede aproximar esta estructura, a empresas que sólo poseen una (o pocas) instalación física de servicios o fábrica. Para el sistema descentralizado cada unidad de negocio de la empresa tiene su propio organismo de planeación, ejecución y control del mantenimiento; es típico encontrarlo en organizaciones de gran magnitud con muchas instalaciones físicas de servicio o con muchas empresas (o fábricas) propias (o filiales) y/o que físicamente son distantes y pertenecen a una sola corporación(HajShirmohammad, y otros, 2004). Por último, el término intermedio que es una mezcla de las dos anteriores, es una estructura organizacional más compleja y difícil que las dos anteriores, se puede encontrar en empresas que evolucionan en su crecimiento, hacia la expansión al buscar el sistema descentralizado o de recogimiento o reducción hacia el modelo centralizado. La mezcla puede darse en cualquiera de las funciones de planear, ejecutar o controlar, en dos de ellas o en todas.

Otro punto de vista desde el cual se debe ser analizar la evolución estructural de mantenimiento, es en su grado de dependencia; es indiscutible que al ser mantenimiento una división de servicio y de apoyo logístico a fabricación, es lógico pensar que nazca de este departamento; por lo tanto en las primeras etapas de desarrollo es probable que dependa enteramente del área operativa, en este modelo de dependencia es producción quien toma las grandes decisiones de mantenimiento, siendo el área de manufactura omnipotente en el direccionamiento, planeación, control y ejecución del mantenimiento.

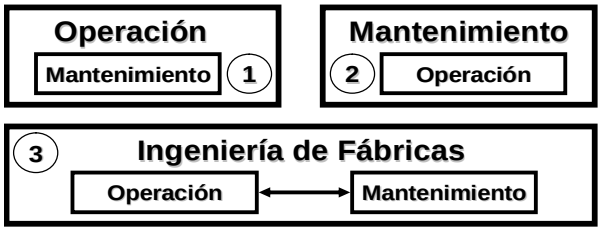
Los inconvenientes que presenta la dependencia de mantenimiento de producción, son entre otros: desconocimiento del área técnica y de la no disponibilidad de tiempo para profundizar en los problemas y en la ciencia requerida para atender niveles tecnológicos altos, falta de una visión de largo plazo en las decisiones de mantenimiento, pues su interés prioritario es la explotación de los equipos, lo cual genera frustración en los funcionarios de mantenimiento y normalmente se ve a mantenimiento como un componente pasivo, generador de gastos en la empresa, es muy difícil la programación de paradas de equipos para la realización de actividades de mantenimiento, normalmente se actúa con acciones correctivas y eventualmente modificativas, no hay ninguna presencia de acciones planeadas, es muy difícil en ellas llegar a la etapa tres de mantenimiento pues no tienen las condiciones para consolidar una táctica y mucho menos una estrategia (etapa IV); en general es poco recomendable para cualquier organización de servicios o fabril(Mora, 2007a).

El estudio EUREKA de *benchmarking* realizado en Europa y Norteamérica en múltiples empresas, marca que en el 23% de las empresas el gerente de operación administraba el mantenimiento y solo en el 16% funcionaban las áreas de mantenimiento y producción en forma conjunta, en el 84% de las compañías la gerencia de

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

mantenimiento tenían una posición jerárquica media (Riis, y otros, 1997)[71].

Ilustración 12 - Estructuras posibles de dependencia de mantenimiento



Otra forma posible de dependencia es un departamento de mantenimiento con amplios poderes y con mucha influencia sobre las demás dependencias de la empresa, en este caso se presentan los mismos síntomas enunciados para el anterior, pero en forma inversa, es muy difícil lograr la programación de la producción, todas las decisiones de ingeniería de fábricas están sujetas a la voluntad variable del área de ingeniería de mantenimiento, es probable que no se tengan parámetros de calidad para evaluar el servicio de mantenimiento y en general este puede ser deficiente, normalmente los costos de mantenimiento son altos y no se puede tener una adecuada efectividad del mismo.

El sistema ideal es que ambas áreas (mantenimiento y operación) tengan el mismo nivel jerárquico, donde el uno actúa como oferente (mantenimiento) de un servicio y el otro como demandante (producción) receptor del mismo, se toman las decisiones en forma alineada y de mutuo acuerdo, este es el modelo ideal y es así como puede funcionar normalmente una empresa de servicios o productos, de esta forma sí se pueden alcanzar las seis etapas de desarrollo planteadas anteriormente.

El tercer punto de vista para analizar la evolución del mantenimiento en el tiempo, es a partir de su robustez, puede hablarse en este caso de varias opciones:

- La primera de ellas es un departamento muy grande, conformado por un número amplio de funcionarios, donde se tiene el concepto de que todas las actividades de mantenimiento y proyectos deben ser realizadas al interior de mantenimiento, entre las limitaciones que tiene esta organización es en lo referente a costos, normalmente se tienen costos mayores que los de proveedores externos, no siempre se alcanza a cubrir todas las actividades y necesidades de sostenimiento y siempre se solicitan más recursos (físicos y humanos) en las instancias superiores.

- Otra opción (la segunda) es un departamento minúsculo, siempre escaso de recursos, totalmente antagónico al anteriormente descrito.

- La tercera posibilidad, es la tendencia mundial de tener un departamento de mantenimiento muy concentrado, con el personal mínimo necesario para las actividades claves, declaradas como no indiferentes que agregan valor y de una importancia estratégica muy alta para la empresa en cuestión, donde las tareas de mantenimiento de menor valor agregado se subcontratan, las acciones de baja tecnología o de amplio conocimiento de mantenimiento se trasladan a operación con bajo riesgo de error, aquellas labores en donde se dispone de proveedores locales o internacionales con mayor valor agregado y/o tecnología que los que tiene la propia empresa se subcontrata con precios inferiores a los internos, el personal de mantenimiento que queda es de alto conocimiento técnico y se destina principalmente a las tareas trascendentales de ingeniería de mantenimiento, éste es el modelo más recomendado por su alto contenido técnico, con un alto valor agregado en el servicio de mantenimiento, en general propende un alto grado de satisfacción al cliente interno (producción u operación) o externo, con la mayor oportunidad y al menor costo posible.

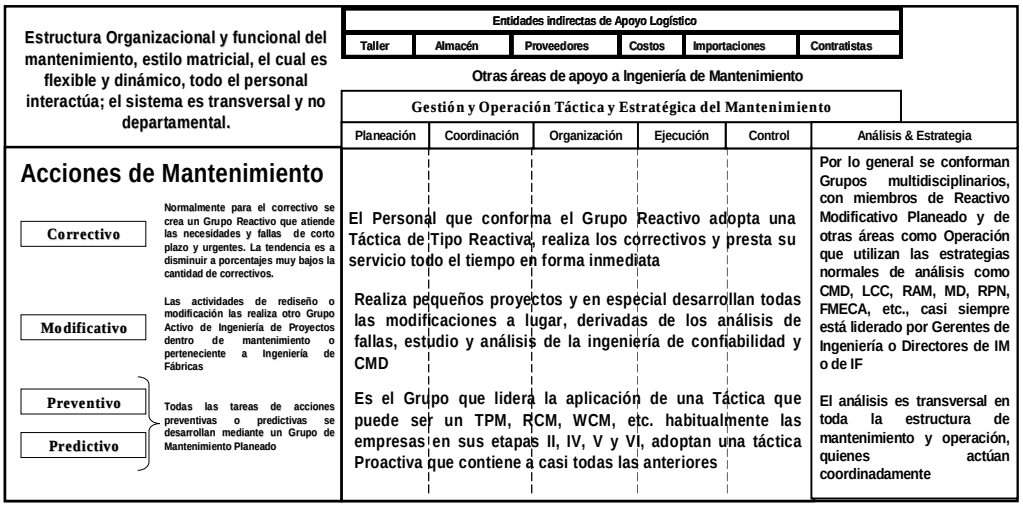
---

[71] *Estudio EUREKA: European Benchmark Study on Maintenance, EBSOMEU 724 (1993). OnLine página Web http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VJD-3X0M521-5&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=5103a3511d9422c6db67bbc55407d48f*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- La cuarta forma de revisar la estructura organizacional de mantenimiento es mediante el estudio de su organigrama funcional y de los diferentes roles que se asumen por parte del personal en el desarrollo de las funciones normales, el autor ha revisado varios libros especializados, ha tenido la experiencia en diferentes empresas de diversos países en dos continentes, a partir de lo cual se puede afirmar que no hay un modelo único y exitoso con relación a cómo estructurar el mantenimiento; lo que si se observa en las organizaciones que alcanzan las etapas III, IV, V y VI, es que su estructura es de tipo matricial, donde se tienen funciones y cargos, al utilizar acciones de mantenimiento, al asumir una táctica y todo esto lo manejan mediante una estrategia (Mora, 2007a).

Ilustración 13 - Estructura sistémica, organizacional y funcional de mantenimiento



(Mora, 2007b)

La particularidad de este sistema es que es dinámico y flexible, en el se conforman grupos de diferentes acciones de mantenimiento: correctivo, modificativo y planeado; se pueden adoptar diferentes tácticas en simultáneo, con el predominio de una en especial, las funciones estratégicas son transversales. En general su éxito estriba en que se adapta a cada organización en particular, pero es simplemente una directriz que es beneficiosa en la medida que se acomode a las necesidades y en especial a la etapa de desarrollo de mantenimiento en que se encuentre la empresa.

1.4.5.2.3 Importancia económica y tecnológica de mantenimiento

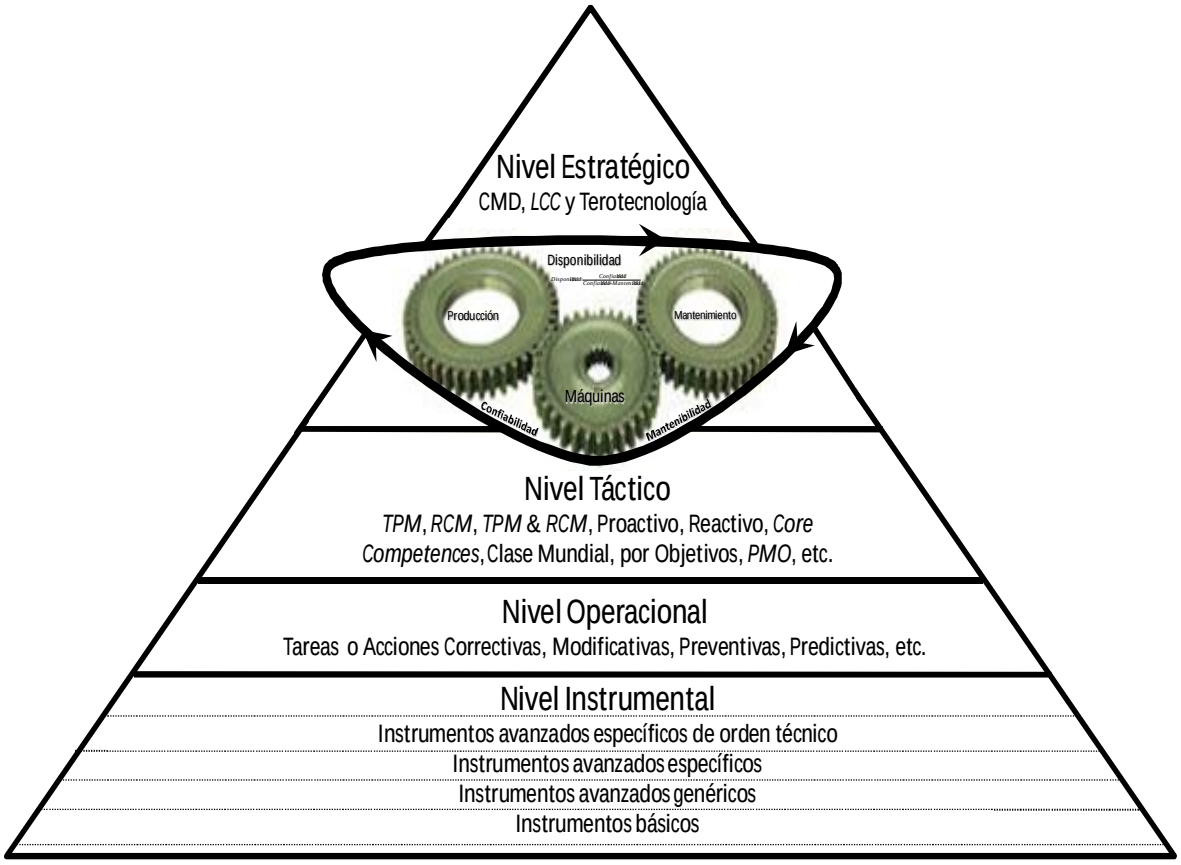
La realidad que adquiere la etapa VI de mantenimiento bajo la orientación de gestión de activos, la posiciona como estratégica dentro de la organización, lo cual la convierte en un área clave, donde se deben enfatizar todos los esfuerzos posibles de la empresa hacia la búsqueda de beneficios económicos de corto y mediano plazo.

El departamento de mantenimiento desarrollado como una unidad estratégica de negocios generadora de ingresos, es la meta en las últimas décadas en Bélgica, Europa, Estados Unidos y muchas otras tantas naciones del mundo. En este aspecto muchos autores e industriales investigan al respecto, al tratar de cambiar el enfoque cerrado de mantenimiento orientado a producción.

Esta situación se ve influenciada positivamente por: el aseguramiento de la calidad en mantenimiento, en producción y en las demás divisiones industriales y técnicas de las empresas; la necesidad de diseñar planes estratégicos especiales de mantenimiento que estén en concordancia con los de la organización, el creciente aumento en la calidad del personal operativo y ejecutivo de mantenimiento, la utilización de nuevas estrategias de gestión, el efecto de planes muy eficientes de capacitación y entrenamiento de personal directivo y de planta. La buena gestión de mantenimiento genera muchos ahorros a las empresas y en algunos casos produce otras fuentes de ingreso para la organización (De Groote, 1994).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 14 - Enfoque Sistémico Integral Kantiano de Mantenimiento Estratégico



(Mora, 2007a)

El mantenimiento proactivo de la etapa III, considera que los mantenedores quieren hacer algo más que registrar y mantener sus activos, su gran objetivo es investigar científicamente mediante una metodología formal de análisis de fallas y de causa raíz, las causas que originan la falla (AMEF@,2005), desean aumentar la confiabilidad y la mantenibilidad, a través de reingeniería de activos; a la vez que pretenden optimizar la gestión y operación del mantenimiento al utilizar las metodologías de rediseño de procesos, en forma sistémica orientándose por la gestión de activos (Tavares, y otros, 2007).

Durante las etapas IV, V y VI se evalúan los riesgos de cada parte del proceso productivo (o de servicio), es donde se tiene en cuenta la implementación de la teoría de restricciones (*TOC*) en búsqueda de cuellos de botella de la producción, para lo cual se realiza el análisis de criterios para mejorar la eficiencia, o ampliar su capacidad, o duplicar este elemento mejora su confiabilidad. Se agrega a lo anterior una serie de técnicas para evaluar el reflejo en los costos de producción (o generación del servicio) y los riesgos a la seguridad y al medio ambiente; así como la búsqueda de una mejor ejecución de las actividades de mantenimiento.

Estas tres etapas también permiten la utilización del análisis de las actividades basadas en costos por medio de la investigación de sus vectores[72] de origen, para determinar aquellos que agregan más valor a los procesos o a los servicios al procurar su mejora, a la vez que admiten la posibilidad de eliminar o reducir los rubros que aportan menor valor agregado.

Los direccionadores de costos son las formas como las actividades consumen los recursos y establecen la relación entre ellos (recurso que se utiliza y actividad), esto se logra aplicar con las técnicas de tableros de control (*Balanced ScoreCard* (Cuadros y Tableros de Control) (Kaplan, y otros, 1997) empleado a mantenimiento (RCMScorecard@, 2005) (Mather, 2005) o de signos vitales (*Vital Sign* del *Quantum Performance*) (Hronec,

[72] *También denominados Direccionadores.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

1995). Además se utilizan de forma masiva los indicadores de clase mundial en el proceso de decisión, al comparar la relación disponibilidad versus necesidad (demanda) (González, 2004). A todo esto se suma la utilización de la técnica de Árbol de Decisiones (o cuadro de decisiones del *FMECA* (AMEF@, 2005) o *RCFA*(Stamatis, 1995)) para definir el tipo de intervención más adecuada a aplicar, de tal manera que los costos totales sean los más bajos posibles, sin disminuir el grado deseado de calidad y atención, a los plazos prometidos de intervención a producción.

De todas formas es normal que las empresas evolucionen en su recorrido histórico por todas las etapas (o en algunas de ellas) de una u otra manera, con un desarrollo armónico, acorde al momento en que viven, tanto desde los aspectos técnicos como comerciales y de mercado.

Al final del proceso evolutivo, aparece la gestión de activos como un sistema de administración de mantenimiento (operación, ingeniería de fábricas y/o de confiabilidad) que permite interrelacionar todos los departamentos dentro de una empresa, al trabajar de una forma integral, con el fin de optimizar todos los activos que se utilizan para el objetivo social de la empresa; al facilitar los procesos de producción y de mercadeo, con información total en tiempo real en una plataforma informática. Su utilización proporciona un valioso apoyo para los procesos estratégicos y operativos de la empresa, siendo así una herramienta eficiente para el aumento de la disponibilidad, productividad y minimización de los gastos.

La gestión de activos incorpora el concepto del ciclo de vida de los activos (*LCC*[73]) al colaborar a las empresas a utilizar mejor sus recursos y a ajustarlos a la demanda actual y futura; a la vez que alarga la vida útil de las máquinas. El soporte que da la gestión de activos a lo largo de todo el ciclo de vida, maximiza la utilización de los recursos en el tiempo, a la vez que puede acortar el período de realización de un proyecto o de la ejecución de mantenimiento u operación.

La inversión monetaria que se utiliza en la gestión y operación del mantenimiento, representa un alto porcentaje del capital de trabajo total de la empresa, inclusive en ocasiones llega a ser tan alto como el capital requerido para la producción y el manejo de insumos y materias primas. Las inversiones en equipos son muy relevantes, pero es poco probable que sean suficientes por sí solas, requieren ir acompañadas de mucha inversión en infraestructura, gestión y operación.

Los costos asociados a los departamentos de mantenimiento, son un rubro importante dentro del balance general de las empresas, el mayor porcentaje de los activos de una organización está representado por tierra, edificios y equipos; los cuales tienen un impacto directo sobre el valor neto de la compañía y la habilidad de ésta de generar utilidades (Wrennall, y otros, 1994).

EUREKA, estudio de *Benchmarking*[74] realizado en cinco países escandinavos y en Norteamérica, muestra la influencia de las diferentes tecnologías y culturas empresariales sobre la gestión de mantenimiento. Por ejemplo, en Dinamarca las compañías entre los años 1981 y 1991 invierten en mantenimiento aproximadamente el 4.9%[75] del valor de sus activos, cifra que posteriormente se incrementa desde 1991 a 2000 en un 0.6 % (Thorsteinsson, y otros, 1997) (Riis, y otros, 1997). El estudio complementario del EUREKA-93, liderado por Wireman, sobre industrias norteamericanas, muestra que ellas gastan en promedio anual en mantenimiento entre el 10% y el 15%. Dentro de los problemas que tienen las industrias americanas aparecen: altos inventarios de repuestos, averías inesperadas, falta de control, deficiencia en la gerencia, etc.(Wireman, 1994) (Wireman, 2001).

Citan Navarro y otros autores, que las industrias norteamericanas en general cuando poseen estructuras fabriles con menos de cinco años de existencia, invierten alrededor de un 5% de sus ingresos en mantenimiento, en la medida que esta edad de equipos empieza a incrementarse también aumenta lo que invierten en el mantenimiento de su maquinaria hasta alcanzar cifras cercanas al 15% de las ventas brutas.

El autor cita varios datos sobre: un estudio realizado en Inglaterra que revela que el costo de mantenimiento allí oscila aproximadamente en el 17% anual del valor de las instalaciones, un personal de mantenimiento próximo al 15% del total y un valor del 5 % de las ventas (que coincide con el enunciado por Newbrough), en España en

[73] *Life Cycle Cost – Ciclo de Vida Económico, costos integrales a lo largo del proceso de vida del activo.*
[74] *Se define como aprender de los otros (personas o empresas), identificarlos, estudiarlos y mejorar, basándose en lo que se ha aprendido (Boxweell, 1994, 15).*
[75] *La cual se compone de: 32% en repuestos, 31% en mano de obra y 23.8% en proveedores de servicios externos de mantenimiento, otros en varios.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

promedio es del orden del 10.5% del PIB[76] (Newbrough, y otros, 1982) (Navarro, y otros, 1997).

Estos hechos denotan la importancia y el volumen económico tan relevante que se maneja en el área de gestión de mantenimiento, lo que induce a dedicar más esfuerzo de gestión y organización al tema de mantenimiento (Newbrough, y otros, 1982). En Francia la inversión y/o los gastos de mantenimiento oscilan entre el 5 y el 8% de las ventas totales o del valor de los activos totales de la empresa (Sourís, 1992). En Suecia la industria manufacturera invierte en mantenimiento cerca del 15% en promedio (entre el 11 y el 30%) de los costos de producción (Ahlmann, 1987).

El rubro de mantenimiento en los países en vías de desarrollo es más alto que en las naciones enunciadas en párrafos anteriores. En general para todos ellos se justifica darle el mayor apoyo logístico a mantenimiento con el fin de optimizar los recursos económicos de la empresa, ya que el capital de trabajo es muy sensible al rubro de mantenimiento.

La gestión de activos permite obtener la máxima rentabilidad de los equipos de operación empresarial, esto se puede lograr de varias maneras, entre ellas se pueden enunciar: aumentar la demanda, disminuir los costos de fabricación, optimizar el apalancamiento financiero, mejorar los procesos logísticos, disminuir los costos de mantenimiento, entre otros; especialmente los gastos de sostenimiento se pueden disminuir de diferentes formas, y están entre las formas sobresalientes: la eliminación o control de las fallas, lo cual se logra con la utilización del análisis de fallas, *FMECA, RCFA, RPN* y mediante la ampliación de los tiempos entre mantenimientos, este último se alcanza cuando se controla el factor βeta del CMD, debido a que se puede mantener el nivel de confiabilidad de los equipos aún al ampliar los tiempos entre acciones de mantenimiento (siempre y cuando no vuelvan a aparecer fallas ya controladas anteriormente).

Si bien los aspectos económicos hacen de mantenimiento una de las áreas más relevantes en las empresas, no se quedan atrás los factores tecnológicos, debido a los avances técnicos y científicos mundiales en todos los campos de la ciencia y en especial en los procesos de manufactura, a través de los cuales se realiza la agregación de valor a servicios, productos y bienes masivos, al utilizar los equipos de producción, los cuales a su vez requieren del servicio de mantenimiento; esto exige que se establezcan parámetros en el área de sostenimiento, que puedan dar respuesta a estos nuevos requerimientos de las áreas de producción, suministros y distribución. A tal efecto se deben tener en cuenta nuevos desarrollos científicos y experimentales en el tema, así como las más modernas técnicas de gestión y operación del mantenimiento, que mediante la aplicación de ciencias modernas como la Terotecnología, pueda enfrentar los nuevos retos tecnológicos del área.

Wireman define el mantenimiento como la última frontera. Quiere decir que es un nuevo descubrimiento, muestra su gran potencial en las empresas, esboza su gran capacidad para contribuir a la mejora de la competitividad de las organizaciones.

Numerosas tecnologías y diferentes organizaciones industriales, han influenciado en las conductas gerenciales de mantenimiento. Menciona que los grandes desarrollos implementados en las industrias, obligan a la gestión de mantenimiento a ser un área de permanente aprendizaje tanto en el campo tecnológico como en el científico. En el presente, la tecnología y las organizaciones son las que definen las pautas de los sistemas gerenciales de mantenimiento (HajShirmohammad, y otros, 2004) (Thorsteinsson, y otros, 1997) (Wireman, 1994) (Wireman, 2004).

1.4.5.3 Definiciones y significados.

El papel de mantenimiento es el de incrementar la confiabilidad de los sistemas de producción al realizar actividades tales como planeación, organización, control y ejecución de métodos de conservación de los equipos. Sus funciones van más allá de las reparaciones; su valor se aprecia en la medida en que éstas disminuyan como resultado de un trabajo planificado y sistemático con apoyo y recursos de una política integral de los directivos (Mora, 1999).

Los elementos comunes encontrados en los países nórdicos indican que la gestión de mantenimiento necesita tener unos parámetros comunes para su buen funcionamiento, tales como: definir unos objetivos claros para su

[76] *PIB – Producto Interno Bruto.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

mejor funcionamiento, tener adecuados sistemas de información para la toma de decisiones, planear y controlar las actividades relevantes de mantenimiento, entrenar e investigar mucho alrededor de la gestión tecnológica de mantenimiento, etc.; todos con el fin de alcanzar niveles óptimos en sus procesos de mantenimiento industrial (Riis, y otros, 1997) (HajShirmohammad, y otros, 2004).

La prolongación o la recuperación de las funciones de la maquinaria está directamente relacionada con el mantenimiento; sus objetivos son prevenir eventos indeseables y evitarlos, recobrar para el servicio los mecanismos que han fallado y, en general, asegurar la disponibilidad apropiada para la producción.

La labor que cumple mantenimiento, es la de procurar el buen estado de los equipos para la adecuada función de producir bienes en las organizaciones, mediante la sistematización de la información, como el medio eficaz para el buen desempeño de la organización (Wireman, 2001) (Riis, y otros, 1997) .

Los doce principios más importantes en la gestión de mantenimiento enunciados por la comisión EUREKA son:

Ilustración 15 - Principios básicos de mantenimiento

Temas Técnicos	Recursos Humanos	Campo Económico
•Servicios •Productos •Calidad de los productos •Métodos de trabajos de mantenimiento •Manejo de materiales óptimo •Control de todas las actividades de mantenimiento.	•Función de relaciones internas del personal •Función de relaciones externas •Función de la organización del mantenimiento	•Estructura de mantenimiento •Economía en la gerencia de mantenimiento •Economía frente a la producción

1.4.5.3.1 Gestión y Mantenimiento

La palabra gestión se relaciona con la dirección de empresas, aplicada a un sistema técnico y social cuya función básica es crear bienes y/o servicios que contribuyan a elevar el nivel de vida de la humanidad. La expresión empresa se entiende como un conjunto formado por hombres, máquinas, tecnología, información, planeación y recursos financieros o de cualquier índole que procura alcanzar unos objetivos establecidos con antelación (eficacia y eficiencia), al manipular adecuadamente los recursos disponibles (eficiencia) a la vez que se protege la naturaleza con la mayor efectividad. La gestión es el integrador para lograr estas premisas (De Miguel, 1990).

La eficiencia con que la gestión de mantenimiento contribuye para alcanzar la producción total mediante la dotación de capacidades y fiabilidad del parque industrial, se plasma al maximizar la disponibilidad de los equipos (Rey, 1996).

La gestión de una empresa se refiere a su administración, y está relacionada con las desagregaciones que hace Fayol: planear, organizar, dirigir, coordinar y controlar (Fayol, y otros, 1996); las cuales se sintetizan abruptamente en general por las escuelas modernas de gestión en: planear, ejecutar y controlar.

La gestión involucra el concepto de conducción o dirección aplicada por diferentes personas al través de la organización, en las empresas formales está diseminada en todos los niveles de la estructura y se ejerce en todas las divisiones de ella, no es propia de algo, incluye personas o grupos de personas.

En mantenimiento es necesario reconocer dos aspectos básicos: gestión y operación, la primera se refiere al manejo de los recursos, a su planeación y a su control, mientras que la segunda es la realización física del servicio de mantenimiento.

Los autores Navarro, Pastor y Mugaburu enuncian que la gestión de mantenimiento debe enfocarse en dos direcciones: una de ellas es en la gestión que realiza mantenimiento con los demás departamentos enmarcado dentro de los objetivos de la empresa y el segundo nivel en la gestión integral e interna propia del departamento. La primera de ellas define las pautas que se siguen en las buenas relaciones que debe tener mantenimiento para poder operar dentro de un marco integral de la empresa, con el fin de buscar mejores niveles de colaboración y de

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

trabajo en equipo al seguir las pautas de la organización; en el segundo bloque de gestión integral interna depende exclusivamente de cómo disponga sus recursos productivos para generar un buen servicio de mantenimiento al menor costo posible y con la mayor calidad al lograr excelentes niveles de satisfacción al cliente.

Lorick se refiere a la gestión de mantenimiento, como la organización de un área gerencial de mantenimiento que exige la necesidad de establecer sistemas de gestión y operación mediante procesos, apoyándose en sistemas computarizados para manejar las actividades inherentes a mantenimiento. Los pasos que se requieren para implementar este proceso sistémico son: establecer una organización que permita gerenciar el sistema de mantenimiento, de tal forma que se pueda tener una planeación detallada global y específica de las rutas y actividades del mantenimiento a realizar, utilizar el sistema de información para definir en forma anticipada todos los servicios y los recursos necesarios para la operación del mantenimiento, instaurar metodologías que permitan el mejoramiento permanente tanto de las actividades como de la gestión, conformar grupos interactivos de análisis y operación del mantenimiento, desarrollar sistemas de monitoreo de todas las actividades y del control de la gestión global incluidos sus costos, con permanentes reportes de indicadores de toda índole; indudablemente todo esto contribuye a elevar la eficiencia (Lorick, y otros, 1998) (González, 2004).

El autor Sourís afirma que las diversas funciones para la gestión de mantenimiento parecen coincidir en que es el área encargada de asegurar la disponibilidad de equipos a producción, mediante la ponderación de las imperfecciones de diseño, de las obsolescencias tecnológicas y de la acción del tiempo. La gestión de mantenimiento debe estar enmarcada dentro de los objetivos de la empresa, lo cual se concreta en un presupuesto según la actividad industrial de la empresa origen. Las limitaciones de mantenimiento varían con el tipo de industria, pero dependen de: disponibilidad financiera, políticas de utilización del parque industrial, niveles de productividad, fiabilidad de los equipos, vida útil de los equipos, obsolescencia tecnológica de las máquinas, calificación y calidades del personal de mantenimiento[77].

Por otro lado Reiter expresa que la gestión de mantenimiento debe proveer un sistema que planifique, organice, dirija, controle y administre todas las actividades inherentes al mantenimiento a la vez que debe permitir un negocio eficaz, fiable, ágil, capaz de responder a las necesidades de producción, que procure la competitividad y la productividad de la empresa y tenga activa participación de sus empleados (Reiter, y otros, 1994).

El esquema moderno de mantenimiento implica la vinculación de herramientas propias de la gestión, el concepto integral se maneja desde la base de utilizar en forma eficaz y eficiente los factores productivos en forma individual y conjunta, para aplicarlos mediante una adecuada gestión de mantenimiento (correctiva, modificativa, preventiva, predictiva o combinación de ellas), con la definición de metas concretas a lograr en cada una de las variables importantes de mantenimiento, al utilizar el concepto de servicio al cliente, para centrar la organización en el desarrollo de habilidades y competencias esenciales en el recurso humano motivado, para satisfacer los requerimientos del usuario de mantenimiento interno o externo (Mora, 2007b).

Se resalta la importancia de que mantenimiento deja de trabajar bajo el enfoque de manejar un presupuesto a tener que salir a buscar sus propios ingresos (gestión de activos), para lo cual debe desarrollar estrategias de mercadeo que le permitan alcanzar niveles de productividad y competitividad (Dounce, 1998); mediante el establecimiento de planes estratégicos de alta dirección como empresa independiente que tiende a convertirse en generadora de ingresos propios y adicionales a la empresa de su origen. La gestión de mantenimiento contempla la planeación, organización, coordinación, dirección, ejecución y control de todas las actividades inherentes a mantenimiento con el fin de cumplir su misión.

1.4.5.3.2 Función y Objetivo de mantenimiento

Según Albert Ramond y Asociados (Estados Unidos de América) la función principal de mantenimiento es maximizar la disponibilidad que se requiere para la producción de bienes y servicios, al preservar el valor de las instalaciones, para minimizar el deterioro de los equipos; lográndolo con el menor costo posible y a largo plazo (Newbrough, y otros, 1982). El objetivo de mantenimiento es: "conseguir un determinado nivel de disponibilidad

[77] *La alta interrelación de mantenimiento y producción, se ratifica en el hecho de que la gestión de mantenimiento depende básicamente de la tecnología de los equipos de producción y del tipo de actividad industrial y organización a la que se pertenece; se afirma nuevamente que lo más importante en un departamento de servicio como lo es mantenimiento es el recurso humano; se resalta la importancia de que la gestión de mantenimiento debe ir en concordancia con los objetivos de la empresa. Se considera que enmarcar a mantenimiento dentro de un presupuesto económico limita su crecimiento y desarrollo hacia las habilidades y competencias, y lo deja incrustado bajo la dependencia de producción sin la posibilidad de que se facturen los servicios y se puedan desarrollar actividades de productividad y competitividad frente a proveedores externos.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

de producción en condiciones de calidad exigible, al mínimo coste, con el máximo nivel de seguridad para el personal que lo utiliza y lo mantiene y con una mínima degradación del medio ambiente. Al conseguir todos estos puntos se está ante una buena gestión integral de mantenimiento" (Navarro, y otros, 1997), si bien es cierto que esta definición tiene un buen cubrimiento, deja por fuera aspectos tan importantes como la libertad del cliente para optar por un mantenimiento propio o subcontratado, además de que no contempla el enfoque de mantenimiento frente al estado de avance de la organización y es indiferente al nivel tecnológico de los equipos, a pesar de que enuncia la palabra integral no dimensiona la posibilidad de que el servicio de mantenimiento atienda clientes externos e internos no tradicionales como aprovisionamiento y distribución.

La función de mantenimiento según la fuerza marítima de los Estados Unidos definida a través de la oficina de operaciones navales de la marina de guerra en 1969 en su documento 3M, como la ejecución de todas las actividades inherentes de mantenimiento que contribuyan al funcionamiento continuo de los sistemas productivos, de los equipos de proceso, dentro de las características originales de diseño, conservándolos en un estado óptimo corporal para una utilización más racional, mediante un uso efectivo y eficiente del presupuesto y del personal de ingeniería de conservación (Mora, 1999).

Rey Sacristán define el mantenimiento como el conjunto armónico de las técnicas utilizadas para asegurar el adecuado funcionamiento de la maquinaria productiva y las instalaciones. En una línea de producción es el conjunto de disposiciones de orden técnico, medios y actuaciones que garantizan la máxima disponibilidad y eficiencia en el cumplimiento de los planes de producción; su eficacia está asociada con la disponibilidad y la confiabilidad con el mínimo costo.

Kelly define a mantenimiento como el grupo de actividades, estrategias y hechos que se realizan para garantizar que en cualquier momento el parque industrial generador de bienes y servicios sea capaz de producir objetos tangibles e intangibles en una organización productiva con la mayor disponibilidad y confiabilidad posibles, para elevar permanentemente la productividad y la competitividad.

Se puede sintetizar la misión principal de mantenimiento, como: garantizar que el parque industrial esté con la máxima disponibilidad cuando lo requiera el cliente (interno o externo) o usuario, con la máxima confiabilidad y fiabilidad, durante el tiempo solicitado para operar, con las velocidades requeridas de los equipos, en las condiciones técnicas y tecnológicas exigidas previamente por el demandante, para producir bienes o servicios que satisfagan necesidades, deseos o requerimientos de los compradores o usuarios, con los niveles de calidad, cantidad y tiempo solicitados, en el momento oportuno al menor costo posible y con los mayores índices de productividad y competitividad posibles, para optimizar su rentabilidad y generar ingresos, involucrar siempre el mejoramiento continuo en todas las facetas, al utilizar las mejores prácticas internacionales y científicas, centrado en el servicio al cliente con la mayor oportunidad, por razón de la investigación y el desarrollo de la tecnología de mantenimiento con base en la ciencia, al establecer habilidades y competencias, con la administración de sistemas de costeo que permitan una facturación adecuada a precios más competitivos que los del medio y tener en cuenta la posibilidad de subcontratación en mantenimiento. Debe analizarse también la capacitación y culturización de los clientes mediante un enfoque integral logístico[78] que utilice una estrategia coherente con la empresa (Mora, 2007b)[79].

1.5 Resumen del Capítulo 1 – Introducción

Esta primera sección describe de una forma estructurada y sucinta la historia de diferentes hechos que inciden en los criterios fundamentales del mantenimiento y de la producción industrial de la actualidad, a la vez que presenta los diferentes eventos y sucesos que definen la estructura fundamental y organizacional de una división de mantenimiento industrial, con lo cual el lector puede construir sus conceptos mentales sobre los criterios y parámetros que se deben tener en cuenta, a la hora de implementar la gestión y la operación del mantenimiento a

---

[78] *La logística pura, cuya definición se aproxima a "prever las acciones y proveer los recursos humanos y factores productivos necesarios para poder desarrollar transporte, almacenamiento o transformación de materias primas, productos semi-terminados, bienes tangibles, energía y señales durante el aprovisionamiento, la operación, el mercadeo y la distribución física, mediante herramientas de planeación, organización, dirección, ejecución, y control estratégico tecnológico que permitan elevar los niveles de competitividad, el grado de innovación tecnológica y la rentabilidad de todos los procesos en la organización". En síntesis se refiere a la logística como el área del conocimiento que procura los recursos físicos (maquinaria, etc.) y humanos requeridos para agregar valor. Lo cual se involucra totalmente al mantenimiento logístico integral estratégico.*

[79] *El autor considera que esta definición complementa las anteriormente citadas y muchas otras que pueden aparecer, en general sólo pretende aportar criterios y parámetros relevantes adicionales a tener en cuenta en la misión de mantenimiento, pero sus conceptos en ningún momento son dogmáticos, ni excluyentes de otros en la definición de mantenimiento.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

nivel empresarial, con el fin de que sean efectivas en resultados.

1.6 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 1

- Según su criterio, establezca al menos cinco etapas del mantenimiento industrial, caracterizando cada una de ellas, con los principales criterios que se dan en cada etapa evolutiva.

- Considera Ud. que mantenimiento debe actuar como una entidad de servicio o de producción, explique al menos tres razones técnicas para ello.

- Según la OIT, ¿cuáles son las funciones principales del departamento o unidad de mantenimiento en una empresa? Enuncie al menos tres y describa su explicación y aplicación.

- Construya una definición moderna de mantenimiento, a partir de las diferentes opiniones y conceptos, de los distintos autores descritos en este capítulo y, argumente su enunciado.

- Argumente al menos cinco hechos históricos de mantenimiento, explíquelos y sustente su incidencia en la estructura que debe tener una división de mantenimiento, en la actualidad, desde la óptica: funcional, operativa, organizacional, de servicio al cliente, complejidad, de gestión, operación y metodología de ejecución de trabajos; que garantice la efectividad del mismo.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2 Enfoque Sistémico e Integral – CMD[80]

El mantenimiento[81] industrial puede definirse como una ciencia, ya que cumple todos los requisitos definidos para ello en la RAE[82], la cual define, que un conjunto de conocimientos obtenidos a través de la observación, del estudio, de la experiencia y del razonamiento, debidamente estructurados en forma sistémica y de los cuales se pueden deducir principios, leyes generales, comportamientos y predicciones, etc., permiten constituir una ciencia (RAE@,2005).

Por su parte Grijalbo y Mondadori complementan la definición de ciencia en los términos:

> "……Ciencia f. Tipo de conocimiento lógicamente estructurado sobre un conjunto grande, amplio de fenómenos que, enfocados bajo un determinado punto de vista, aparecen íntimamente relacionado; engloba definiciones, postulados y leyes enmarcadas en una teoría con que se intenta describir la estructura de una parte de la realidad a la que remite en último extremo su objetividad a través de la verificación, la predicción y, en algunos casos, la técnica…" (Grijalbo, 2000).

En general el mantenimiento cumple con todas las condiciones descritas, ya que posee un amplio y diverso conjunto de conocimientos, que se derivan de la práctica industrial, del estudio de numerosos autores mundiales y locales del tema, del establecimiento de diferentes principios y leyes generales de aceptación universal, de definiciones amplias y específicas sobre los múltiples tópicos que se manejan en esta ciencia.

En cuanto a la presentación lógica, estructurada y coherente de conocimientos es el enfoque que el autor sustenta y demuestra a través del contenido, con un enfoque sistémico kantiano[83] que soporta toda la organización del documento; el cual permite una fácil comprensión y aplicación empresarial de todos los conceptos y métodos prácticos que se presentan.

El considerar el mantenimiento como una ciencia permite su tratamiento profundo, serio, coherente y estructurado, de tal forma que todos los conocimientos que se desarrollan sean realizables y útiles a los lectores.

En este capítulo se dan las bases y conceptos fundamentales para comprender en forma global y específica todos los tópicos relevantes del mantenimiento aplicado, al utilizar los diversos desarrollos mundiales, la experiencia del autor y las mejores prácticas internacionales.

A partir del enfoque kantiano, el mantenimiento es susceptible de sintetizar y de categorizar en diferentes niveles con sus elementos de relación estructural; es pues en este capítulo donde se trata el mantenimiento como una ciencia que data desde los confines de la existencia del hombre sobre la tierra, cuando utilizaba utensilios y herramientas simples y complejas, que le ayudaban en su supervivencia individual y colectiva.

Bajo esta perspectiva sistémica es posible unificar los conceptos, pensamientos y diferentes tópicos del mantenimiento, hasta la fecha tratados bajo esquemas diferentes, el autor aporta una metodología integradora que facilita su concepción y aplicación empresarial.

2.1 Objetivo de Capítulo 2

Revisar los principios fundamentales, las estructuras, las normas, las relaciones, etc., entre los actores relevantes del mantenimiento industrial, bajo una concepción sistémica kantiana e integral, que permita su control mediante la medición de sus principales parámetros universales: confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, bajo estándares internacionales y con base en las mejores prácticas mundiales, con el fin de alcanzar el éxito

---

[80] *CMD – Confiabilidad Mantenibilidad Disponibilidad*

[81] *Mantenimiento: acción y efecto de conservar un objeto o máquina en su esencia o condición (Grijalbo, 2000) (RAE@, 2008).*

[82] *RAE Real Academia Española – www.rae.es - (RAE@, 2008).*

[83] *De Immanuel Kant, (1724-1804) Filósofo alemán, elabora una Teoría del conocimiento en su libro Crítica de la razón pura (1781-1787), que se basa primero en la intuición sensible, después en la razón, capaz de elaborar síntesis de cualquier cosa o de situaciones diferentes, pero que no puede operar sin unos principios lógicos (a priori) que permitan la síntesis: son las categorías, al tiempo formales y trascendentes, los conceptos metafísicos resultan paradójicos, pero desempeñan un papel de unificadores del pensamiento. Su libro la Crítica de la razón práctica (1788), parte de la existencia de actos que no son fruto de la razón, en los que se introduce un nuevo aspecto, el ético: hacer algo porque hay que hacerlo; esta condición previa lo es por sí misma, tiene un carácter formal y es categórica; el lo llama imperativo categórico (Grijalbo, 2000).*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

estratégico, mediante la utilización de un Modelo estandarizado de cálculos y predicción del CMD, al menos hasta la etapa de Alineación – Nivel 2 – Comprender – Escala de Bloom, Barret y Gagñé (Gagné@, y otros, 2008).

2.2 Introducción a Capítulo 2

La segunda unidad de este libro procura que el lector pueda vislumbrar los elementos fundamentales del mantenimiento industrial y sus interrelaciones, bajo un enfoque integral, moderno y diferente a los modelos clásicos, de tal manera que facilite la comprensión con el fin de optimizar sus recursos para su gestión y operación, a la vez que pueda controlar con los más excelsos indicadores de éxito del mantenimiento, como lo son: confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, bajo parámetros y metodologías internacionales.

2.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 2 – Enfoque Integral - CMD

La persona que desee abordar la lectura de esta segunda unidad, debe tener claridad sobre los conceptos básicos de mantenimiento y operación, a la vez que se obliga a manejar con claridad la estructura organizacional de ambos departamentos en las empresas, tiene que tener habilidades fundamentales en la obtención, manejo y procesamiento de datos e información técnica sobre los tiempos de operación y mantenimiento en sistemas industriales, debe conocer y manejar las funciones fundamentales de distribuciones y saber generar cálculos matemáticos seguros y precisos, mediante el seguimiento paciente y riguroso de la metodología propuesta en este capítulo para la medición y predicción confiable de los indicadores CMD.

2.3 Sistema kantiano de mantenimiento

El enfoque sistémico kantiano plantea la posibilidad de estudiar y entender cualquier fenómeno, dado que define que un sistema, está compuesto básicamente por tres elementos: personas, artefactos y entorno.

La participación de las personas en cualquier sistema es fundamental, ya que son éstas las que hacen que el sistema exista y son las que le dan ese carácter real, en forma contextual, de forma mental[84]. Indudablemente el mantenimiento es un sistema mental que se construye de forma intelectual por el ser humano, que se basa en el estudio de los equipos y su comportamiento en el tiempo.

El segundo elemento de un sistema kantiano son los artefactos[85], en el caso particular del mantenimiento, constituyen el conjunto de máquinas, componentes, sistemas de producción, herramientas, utensilios, líneas de fabricación, documentos como órdenes de trabajo o historia de los equipos, aparatos, materias primas, insumos, repuestos, sistemas de información, entre otros; los cuales son los elementos reales requeridos para hacer el mantenimiento.

El tercer componente de un sistema kantiano es el entorno, es de carácter mental (o intelectual) y son todos aquellos sitios en que se desenvuelve la naturaleza del sistema, es donde se encuentran las máquinas que hacen posible la producción de bienes reales o de servicio (Chiavenato, 2005).

El enfoque kantiano permite visualizar y probar la existencia de relaciones entre diferentes elementos de un sistema real o mental, para el caso del mantenimiento se reconoce la existencia de diferentes elementos que se entrelazan; entre ellos se pueden describir las personas: son de forma directa los usuarios o explotadores de los equipos de fabricación, los productores y los que preservan el activo o máquina denominados mantenedores; en cuanto a los artefactos, se incluyen en este grupo, todos los equipos o elementos productivos directos o indirectos que se describen en el texto; por último el entorno, es el que comprende los sitios de producción, como fábricas fijas o móviles, por un lado y, por el otro también incluye los espacios donde se prestan los servicios de mantenimiento.

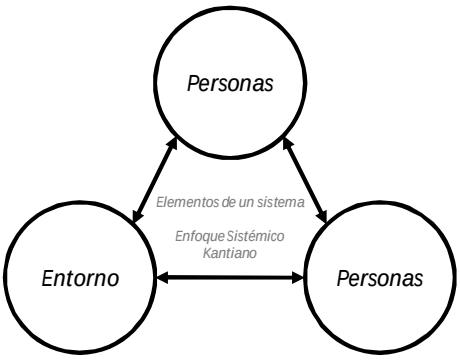
---

[84] *Parece ser que este entendimiento mental es exclusivo de los seres humanos, debe recordarse que existen sistemas mentales a partir de la realidad (que es lo que experimenta el ser humano a través de sus sentidos) y basados en la construcción intelectual (es los que aprende el ser humano a través del tiempo y el análisis como la lectura, las matemáticas, etc.).*

[85] *La Real Academia Española lo define como palabra derivada del latín - arte factus - que significa hecho con arte, u obra mecánica hecha según arte, también lo describe como máquina o aparato o como mueble y en general lo describe como objeto de cierto tamaño construido por el ser humano que cumple cierta función (RAE@, 2008). – Artilugio, aparato o mecanismo (Grijalbo, 2000).*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 16 - Elementos de un sistema kantiano [86]



El modelo de la teoría de sistemas define a los departamentos de las empresas, como módulos administrativos independientes (mantenimiento, producción, etc.), a los cuales los denomina unidades, y estos a su vez conforman un sistema, con metas propias individuales y comunes al sistema (empresa). Un sistema es un conjunto de unidades recíprocamente relacionadas (Bertalanffy1, 1994). Las unidades a su vez se pueden considerar como elementos de un sistema cuando se encuentran relacionados entre sí por alguna forma de interacción o interdependencia (Chiavenato, 2005).

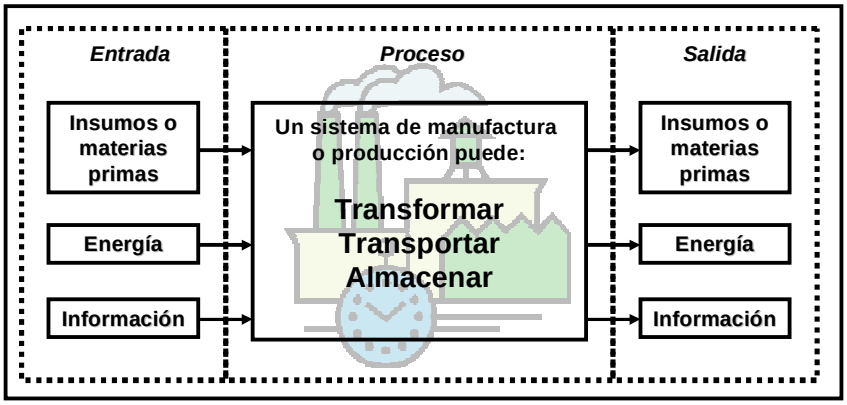
Los objetivos específicos para una unidad, por lo general buscan los mayores beneficios, mediante la maximización de las utilidades y la reducción de los posibles desperdicios de insumos o materias primas, durante el proceso industrial, con una adecuada utilización de los recursos disponibles. Al aplicar el concepto al departamento de mantenimiento se resume en: la prestación de un buen servicio para las instalaciones y el equipo y, así reducir al mínimo las paradas imprevistas de máquinas por fallas; al hacer más eficaz el empleo de dichos elementos y de los recursos humanos, con el menor costo posible (Newbrough, y otros, 1982).

Con el fin de poder entender la aplicación de estos conceptos a un sistema de mantenimiento, se aplica de forma individual e independiente a los departamentos de operación y de sostenimiento de maquinaria, para posteriormente usarlo en un sistema integral industrial, de tal forma que se puede visualizar la interacción de ambas unidades y el sistema global unificado de mantenimiento empresarial.

2.3.1 Unidad de Producción

Al utilizar el enfoque kantiano en un sistema básico de producción, se pueden reconocer tres elementos: productores (Personas), fábricas (Entorno) y máquinas (Artefactos); los cuales interactúan y permiten la elaboración industrial de bienes y/o servicios.

Ilustración 17 - Sistema de agregación de valor fabril, empresarial o de servicios



(Mora, 2007b)

La función propia de un sistema de producción es lograr la agregación de valor, a partir de tres acciones básicas: transformación, transporte o almacenamiento; las cuales pueden estar presentes en forma combinada, es difícil encontrarlas puras en los procesos industriales; por ejemplo en la generación hidráulica de energía eléctrica se puede pensar que la acción fundamental es transformar, más sin embargo es necesario almacenar y transportar la energía como parte de la acción de producción energética; en el caso de una fábrica textil se entiende que la acción más relevante es transformar, pero, igual que la anterior requiere de almacenamiento y transporte para ser completada la elaboración de textiles o derivados; en una oficina estatal de registros de nacimiento y de los

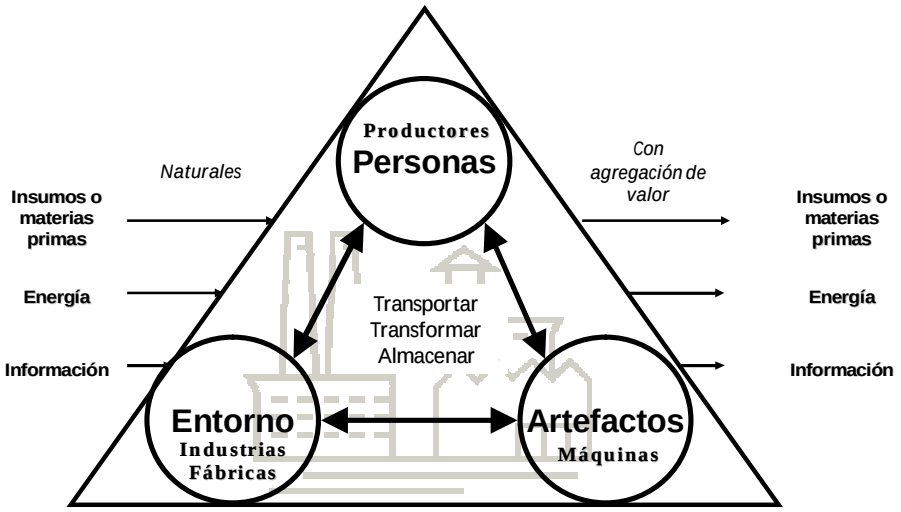
[86] *Las ilustraciones que no tienen Fuente Bibliográfica Ilustración, son propias y elaboradas por el autor, su reproducción o copia están sujetas a condiciones legales, leyes vigentes internacionales y permisos previos escritos del autor. Emails del autor lmora@eafit.edu.co - coldi@une.net.co - coldiltda@mail.com*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

demás actos de la sociedad, básicamente se almacena información pero exige la transformación y el transporte de esta para ser utilizada por y para los ciudadanos; en un sistema de transporte de mercancías en forma simultánea al transportar se desarrolla la acción de almacenamiento.

Las acciones básicas de producción son susceptibles de utilizar en insumos o materias primas (productos en proceso o terminados), información o energía; se logra un proceso de manufactura al aplicarles acciones que las permitan transformar y/o transportar y/o almacenar.

Ilustración 18 - Unidad básica de Producción

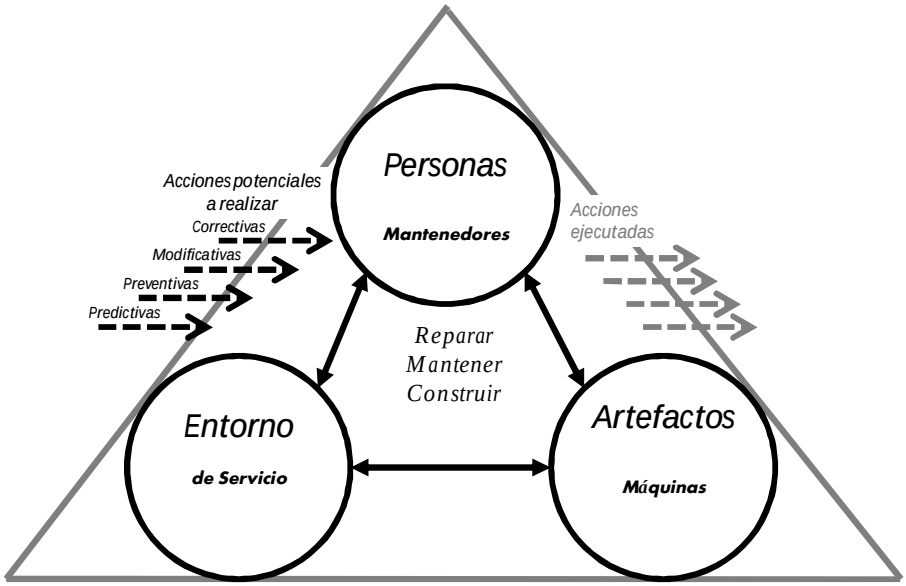


(Mora, 2007a)

2.3.2 Unidad de Mantenimiento

El enfoque sistémico puro cuando se utiliza en mantenimiento, parece admitir el reconocimiento de tres elementos fundamentales: mantenedores (Personas), máquinas o equipos industriales o de operación (Artefactos) y sitios físicos donde se prestan los servicios de mantenimiento (Entorno).

Ilustración 19 - Unidad elemental de Mantenimiento



(Mora, 2007b)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Para poder hallar la función básica de un sistema de mantenimiento es posible utilizar la definición de ingeniería que se describe en la Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones[87] de la Oficina Internacional del Trabajo, donde enuncia que algunas de las funciones de los arquitectos, ingenieros y afines son: construcción, reparación y mantenimiento de edificios, obras públicas, etc. y en especial de aplicaciones industriales como máquinas y equipos, entre otras (OIT-CIUO88, 1988); entendiéndose de este postulado que el mantenimiento es una ciencia que se aplica en elementos, máquinas o sistemas productivos que genera el ser humano, donde su fin es preservar los equipos industriales mediante su construcción, reparación o mantenimiento.

La construcción figura como elemento estructural, en el esquema sugerido por el Autor Rey Sacristán para comprender el marco del mantenimiento terotecnológico (Husband, 1976)(Darnell, y otros, 1975) (Thompson, 1980), donde los usuarios (AOD[88]), los constructores, compradores y demás entidades o personas relacionadas con el cuerpo o la función de equipos industriales, son vitales en el diseño de esquemas de gestión de mantenimiento (Rey, 1996).

El mantenimiento y la reparación son partes esenciales del objeto de estudio (mantenimiento) en ingeniería de fábricas, donde se entiende que la función de mantenimiento depende del ciclo de vida de las máquinas (en sus tres etapas: mantenimiento, reparación o sustitución) y de la situación de reparación, como una especie de mantenimiento especializado en un estado de uso (o abuso) más avanzado del equipo, es decir con una mantenibilidad[89] más reducida (Ávila, 1992).

Ilustración 20 - Funciones primarias de Mantenimiento

Las tareas descritas (construir, mantener y reparar) que se enuncian en el libro CUIO-88, son aplicadas a: "edificios, obras públicas, ciudades, zonas urbanas, otras obras propias de la ingeniería, o de la ingeniería mecánica y afines, y sus aplicaciones industriales-estructuras, instalaciones, máquinas y equipos[90], sistemas y métodos de extracción de petróleo, gas natural y otros minerales o agua, de separación de metales y de refinación y tratamiento; procesos mecánicos, químicos o de otra índole" (OIT-CIUO88, 1988).

Ahora, si se encuentran los elementos comunes entre las unidades de producción y mantenimiento, se puede enfocar con mayor precisión el estudio de los mismos, al igual que permite obtener un sistema más macro e integral, perteneciente a ingeniería de fábricas que contiene ambas divisiones de ingeniería: la de operación y la de sostenimiento[91].

2.3.3 Sistema Integral de Mantenimiento

Con el fin de determinar los actores principales de la ingeniería de fábricas, se presenta, en la siguiente ilustración los elementos superpuestos de las dos funciones básicas. El sistema integrado permite visualizarlos en un sistema de ingeniería de fábricas, que son : los mantenedores, los productores y las máquinas; de esta forma se pueden establecer las primeras leyes de mantenimiento, donde el sistema kantiano permite establecer que la relación entre Producción y Máquinas está gobernada por la confiabilidad, la correspondencia entre Mantenimiento y Máquinas, se estipula por la mantenibilidad; y la relación Mantenimiento-Máquina-Producción[92] se define por la disponibilidad, que es el efecto integrado de la ingeniería de fábricas, donde se marca como el efecto o parámetro más relevante del sistema.

---

[87] *CIUO-88 Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones descrita por la OIT Oficina Internacional del Trabajo (CUIO-88-OIT, y otros, 1991).*

[88] *Aprovisionamiento, Operación, Distribución, o expresado de otra forma son los departamentos internos: suministros, producción o comercialización de una empresa que son o pueden llegar a ser clientes del servicio del área de mantenimiento. Aunque se concibe que AOD pueden ser externos a la organización donde pertenece el área de mantenimiento prestadora del servicio.*

[89] *Mantenibilidad se define como la probabilidad de que un equipo sea restablecido a una condición especificada dentro de un período de tiempo dado, usando recursos determinados y Fiabilidad (Confiabilidad) se define como la probabilidad de que un equipo desarrolle una función específica, bajo unas condiciones específicas durante un tiempo determinado (Mora, 2007a).*

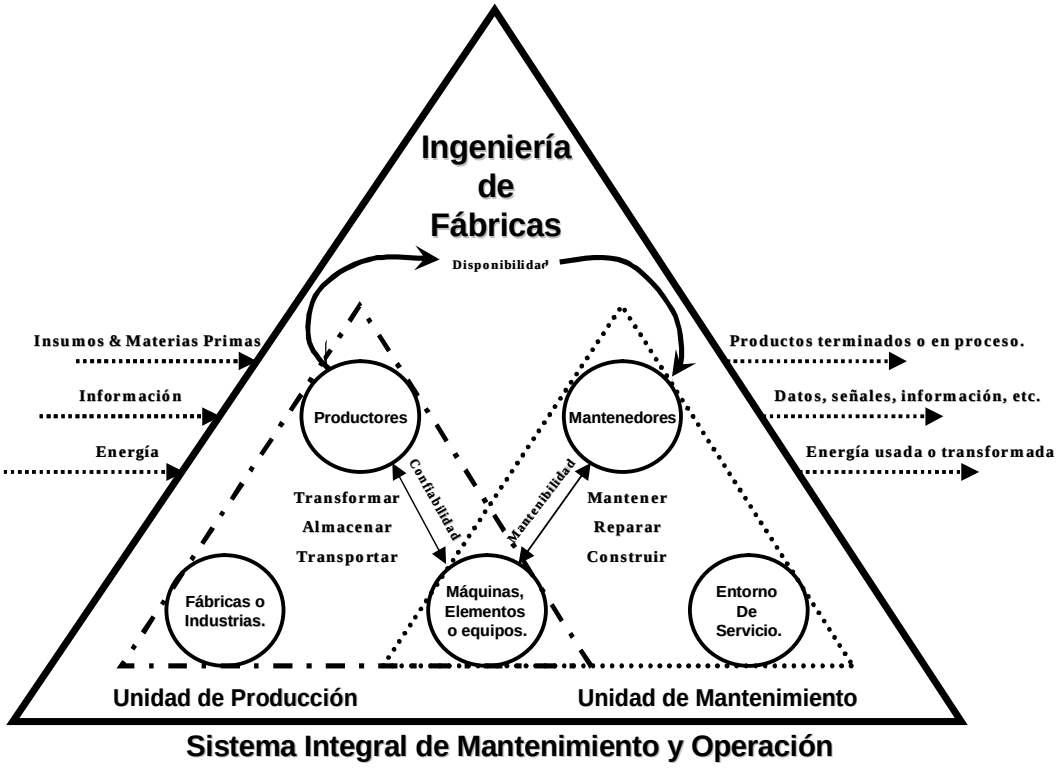
[90] *Estos tres últimos elementos son los objetos donde se concretan las tareas y las actividades de mantenimiento.*

[91] *En castellano, es un término equivalente a mantenimiento.*

[92] *Nótese que no es una relación cerrada, es abierta en Mantenimiento y Producción, estos se relacionan a través de las máquinas y, no en forma directa.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 21 - Sistema Integrado de Ingeniería de Fábricas: Mantenimiento–Máquinas–Producción



(Mora, 2007a)

Se puede entonces afirmar que el enfoque sistémico kantiano de mantenimiento, que se define como ingeniería de fábricas, establece que la relación entre los tres elementos es permanente o cerrada entre máquinas (parque industrial) y los otros dos partícipes (mantenimiento y operación), siendo abierta entre estas dos, de tal forma que las mejores prácticas indican que la relación entre mantenimiento y producción, debe hacerse a través de los equipos[93] y no en forma directa ya que, carece de sentido si no se habla de máquinas y de su comportamiento en el tiempo frente a sus fallas y a su disponibilidad.

El mantenimiento es el elemento que comprende a las personas que ofrecen y prestan el servicio de conservación de equipos a los departamentos o empresas que producen bienes o servicios, mediante los recursos de que disponen.

La producción (AOD)[94], es el elemento que requiere y demanda el servicio de mantenimiento de los equipos que utiliza para producir bienes o servicios.

El parque industrial es el conjunto de elementos, equipos, artefactos, objetos, herramientas o líneas de producción[95], que se utilizan para la agregación de valor en los productos o servicios.

El tratamiento del mantenimiento (como una ciencia) permite sintetizar sus elementos principales en tres: producción, máquinas y mantenimiento; a la vez que admite su jerarquización en niveles de categorías (Bertalanffy, 1994)(Whorf, 1953)(Whorf, 1952)(Uexcüll, 1920) y que establece las relaciones y las condiciones entre sus tres elementos.

---

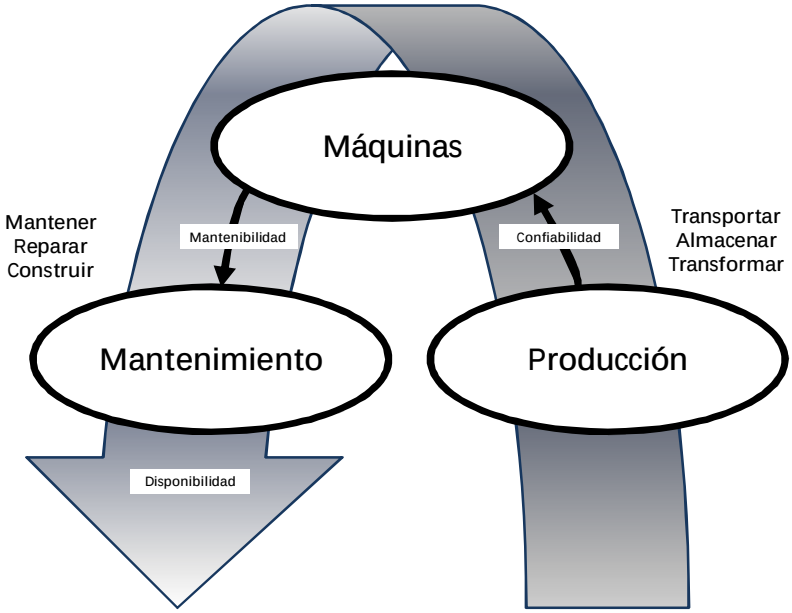
[93] *Es decir que la comunicación y las conversaciones, entre mantenedores y productores, deben referirse en todo momento a las máquinas y no tratarse directamente mantenimiento y producción, para que se mantenga la naturalidad del sistema y, no se caiga en bondades o problemas directos sin una línea coherente del tema de los equipos, que es el que los une principalmente en el enfoque sistémico integral.*

[94] *A.O.D.: Aprovisionamiento, Operación y Distribución: Son todos aquellos departamentos o industrias que realizan actividades de aprovisionamiento u operación y distribución de bienes o servicios, internos o externos a la organización origen del mantenimiento.*

[95] *Donde se aplican las distintas acciones o tareas de mantenimiento.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 22 - Elementos estructurales de ingeniería de fábricas



(Mora, 2007b)

2.3.3.1 Categorización del mantenimiento

El enfoque kantiano admite definir las categorías de la ingeniería de fábricas, como una metodología científica que establece los parámetros jerárquicos (Whorf, 1952) donde se definen las diferentes temáticas conceptuales, esta jerarquización permite unificar el lenguaje y el argot del tema con el fin de facilitar su estudio, tratamiento y aplicación empresarial.

Las categorías son divisiones jerárquicas que permiten simplificar el tratamiento profundo de los diferentes conceptos, que facilitan su organización, que consiente en el análisis de sus diferencias y similitudes, para la estructuración total de los diferentes temas que los conforman.

Una primera aproximación a la categorización del mantenimiento, se encuentra instituida por la casa ESReDa en su Manual *Handbook*(ESReDa, 2001) donde se establecen tres niveles: táctico, operativo y estratégico; para presentar una adecuada clasificación para diversas tareas, acciones y temas del mantenimiento.

Establece la casa noruega ESReDa que normalmente los departamentos no tienen muy definida su estructura organizacional y menos sus costos sistémicos. La función de mantenimiento tiene una alta influencia en la rentabilidad de las empresas y en la ingeniería integradora de plantas.

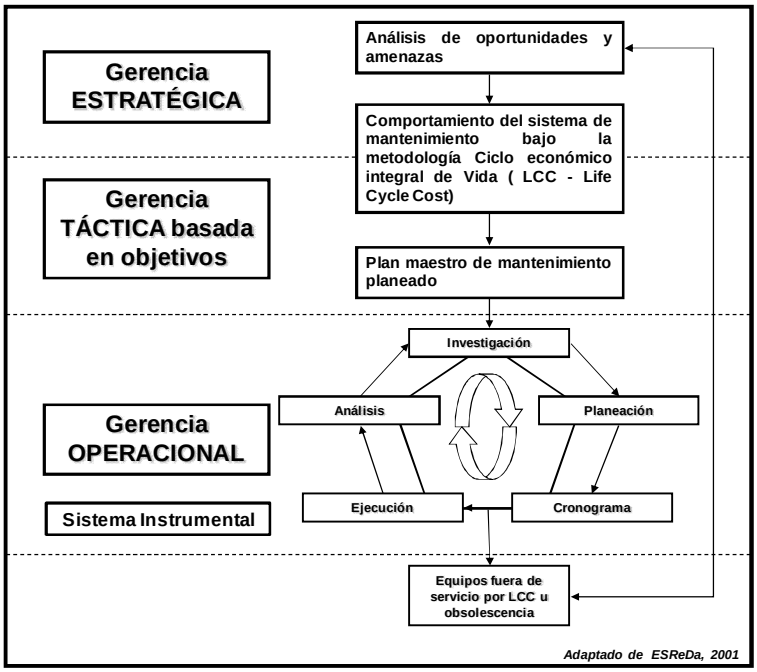
Los controles gerenciales deben apuntar a las metas definidas, a los procesos establecidos y, en especial a las estrategias que se plantean. Esto hace que las empresas puedan descubrir nuevas oportunidades de mercado, mantenimiento y producción, al integrar todos los recursos con las decisiones estratégicas que se toman, de tal manera que todo se haga en un enfoque global y específico (ESReDa, 2001). En general la casa ESReDa establece tres niveles[96] donde se desarrollan todas las actividades y gestiones de mantenimiento.

Si bien ESReDa es un buen acercamiento a la síntesis del mantenimiento, se deben instaurar lazos más fuertes para darle solidez a este concepto, en el cual se fundamenta todo el tratamiento y aplicación de la ciencia mantenimiento (ESReDa, 2001).

[96] *Los niveles se muestran en la parte izquierda de la Ilustración correspondiente.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 23 - Niveles de mantenimiento de la casa ESReDa



El enfoque kantiano se fundamenta en las concepciones de espacio y tiempo, por lo cual es necesario identificar las acciones tanto del espacio como del tiempo sobre las máquinas durante su vida útil.

Parece ser que la acción del tiempo [97] afecta más los componentes o elementos corpóreos de las máquinas y, la acción del espacio, se entiende mejor en la tecnología que portan las máquinas, denominadas alma de los equipos, que consiste en la función principal para lo cual son diseñadas. (ESReDa, 2001)

2.3.3.2 Cuerpo y función de los equipos. Efectos del espacio y del tiempo

El tratamiento que realiza el autor Enrique Dounce Villanueva al tema, es una aproximación importante, él considera que se distinguen dos actividades básicas en la conservación de los equipos industriales: preservación y mantenimiento. Define la conservación como: toda acción humana que, mediante la aplicación de conocimientos científicos y técnicos, contribuye al óptimo aprovechamiento de los recursos existentes en el hábitat humano y propende el desarrollo integral del hombre y la sociedad. La conservación la divide en dos grandes ramas: una de ellas es la preservación (la cual atiende las necesidades de los recursos físicos) y la otra es el mantenimiento (que se encarga de cuidar el servicio que proporcionan estos recursos) (Dounce, 1998).

El mantenimiento enfocado bajo los parámetros de espacio y tiempo de Immanuel Kant, suministra la comprensión de la función del sostenimiento y/o la preservación de los equipos.

La función de mantenimiento, se entiende como sostener o alargar la vida útil de los elementos o equipos de producción, atiende dos componentes básicos de estos: el cuerpo y la función. El efecto que realiza el tiempo (con el espacio invariable) sobre los artefactos o equipos está más asociado al deterioro de los elementos corpóreos[98], al actuar como causante de desgaste o de falla parcial o total en las máquinas.

A diferencia de la acción del espacio (con el tiempo inactivo) que afecta la función se identifica en términos de la tecnología que se usa en los diferentes equipos que prestan la misma función a través del tiempo [99], particularmente se asocia a la falla total o parcial de la función para la cual son diseñadas las máquinas o el parque industrial[100]. Se concibe que dos agentes pueden afectar la vida útil (tanto en cuerpo como en función): el ser humano y el medio ambiente, que deterioran los equipos o los ponen en estado de falla parcial o total.

.

Las actuaciones que se hacen en términos del tiempo, para restituir el equipo a sus condiciones normales de operación (o diseño) dan lugar a la clasificación que se hace de las acciones de mantenimiento: antes o después de la falla.

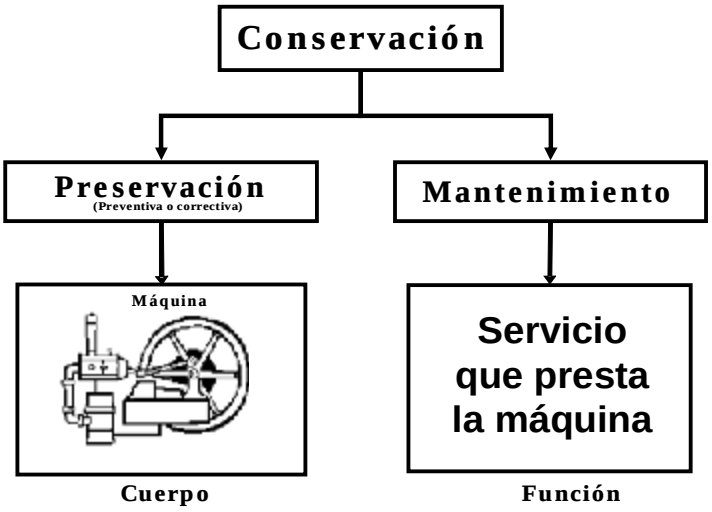
La acción del espacio kantiano, hace que cada vez las tecnologías de los equipos sean más complejas y modernas,

[97] *Espacio y Tiempo del enfoque Sistémico Kantiano o de la Terotecnología.*
[98] *Corpóreos, para denotar que forman parte del cuerpo y siempre son de índole material.*
[99] *Dejando el tiempo constante, como si no existiera.*
[100] *Parque industrial, conjunto de elementos, máquinas, equipos, instalaciones fabriles, etc. ordenadas de tal manera que pueden generar bienes o servicios.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

lo que implica para mantenimiento una mayor utilización de técnicas y prácticas más profundas, más fuertes, más científicas y con mayor uso de informática y tecnología.

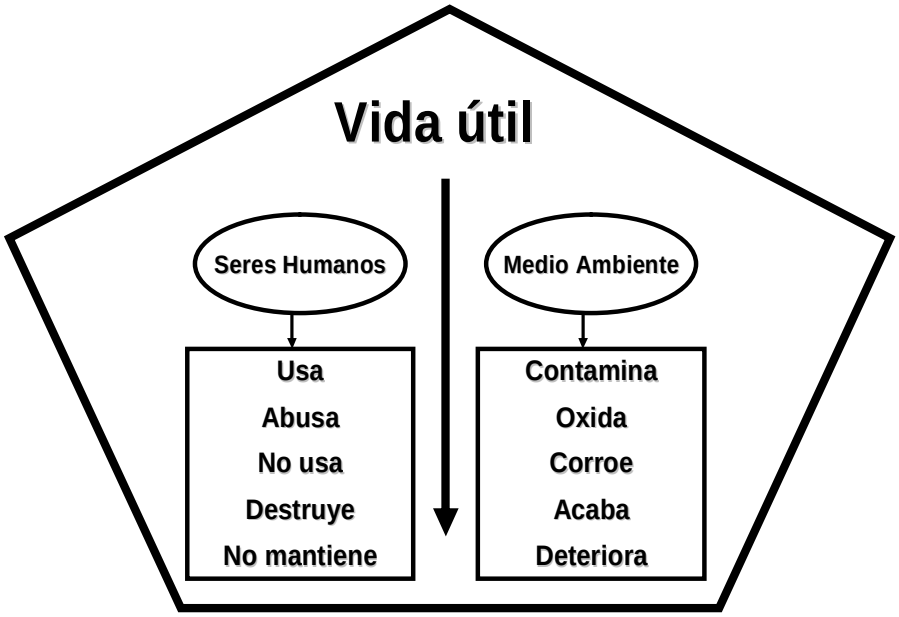
Ilustración 24 - Objeto del mantenimiento



(Mora, 2007a)

Se observa en la Ilustración 26 - Efecto del espacio y del tiempo (enfoque kantiano) sobre los equipos, que la máquina utilizada siempre desempeña la misma función, escribir; lo que cambia es su componente tecnológico (más complejo, al lado derecho). Es el espacio, el componente requerido para que cada día se afinen y se desarrollen más las tácticas de mantenimiento, como el *TPM*, *RCM*, *TPM* & *RCM* Proactivo, *PMO*, Reactivo, Clase Mundial, Centrado en Objetivos, *RCM Scorecard* [101], entre otros.

Ilustración 25 - Agentes que generan fallas o desgastes en los equipos



[101] *RCM Scorecard - Jack Nicolás Jr., construye un sistema de mantenimiento centrado en confiabilidad a partir de los tableros de mando de control Balanced Scorecard de Kaplan y Norton, basado en los trabajos originales de RCM de Nowlan y Heap, de RCM SAE JA 1011 y 1012 y de los trabajos de Mac Smith, con la colaboración de Doug Plucknette, con el fin de poder medir resultados de esta táctica (RCM) (RCMScorecard@, 2005).*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

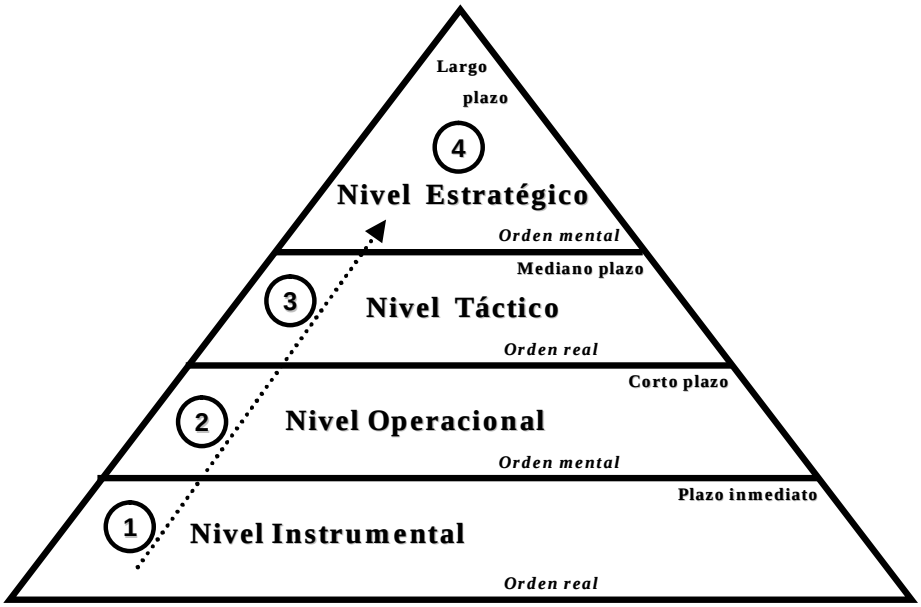
Ilustración 26 - Efecto del espacio y del tiempo (enfoque kantiano) sobre los equipos

(Mora, 2007b)

2.3.3.3 Niveles del mantenimiento

El autor plantea cuatro niveles o categorías al jerarquizar los diferentes tópicos que maneja el mantenimiento.

Ilustración 27 - Niveles y categorías del mantenimiento bajo enfoque sistémico



(Mora, 1999)

2.3.3.3.1 Nivel 1 - Instrumental (Funciones y Acciones)

El nivel instrumental abarca todos los elementos reales requeridos, para que exista mantenimiento en las empresas, procura el manejo sistémico de toda la información construida, solicitada en un sistema de mantenimiento en lo referente a las relaciones entre Personas, Recursos Productivos y Máquinas; pertenecen a

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

este grupo todos los registros, documentos, historia, información, codificación, entre otros; en general todo lo que identifica a los equipos, a los recursos de AOD[102] y de mantenimiento; la administración de la información y su tratamiento estadístico; la estructura organizacional de los tres elementos descritos de un sistema de mantenimiento. Clasifican también en este nivel instrumentos más avanzados como las 5S, el mejoramiento continuo, etc., también se encuentran aquí herramientas avanzadas específicas y de orden técnico, como análisis de fallas, manejos de inventarios, pronósticos, etc.

El nivel instrumental comprende todos los elementos necesarios para que exista un sistema de gestión y operación de mantenimiento, incluye: la información, las máquinas, las herramientas, los repuestos, los utensilios, las materias primas e insumos propios de mantenimiento, las técnicas, los registros históricos de fallas y reparaciones, las inversiones, los inventarios, las refacciones, las modificaciones, los trabajadores, las personas, el entrenamiento y la capacitación de los funcionarios, entre otros.

Se pueden encontrar diferentes niveles dentro de esta categoría en cuanto a instrumentos: básicos, avanzados genéricos y específicos, como también específicos de orden técnico. En general abarca todos los elementos físicos e intangibles que requieren las personas para poder realizar las acciones[103] concretas de mantenimiento sobre los elementos o máquinas.

2.3.3.3.2 Nivel 2 - Operacional (Acciones mentales)

El nivel operacional comprende todas las posibles acciones a realizar en el mantenimiento de equipos por parte del oferente, a partir de las necesidades y deseos de los demandantes. Acciones correctivas, preventivas, predictivas y modificativas.

2.3.3.3.3 Nivel 3 - Táctico (Conjunto de Acciones Reales)

El nivel táctico contempla el conjunto de acciones de mantenimiento que se aplican a un caso específico (un equipo o conjunto de ellos), es el grupo de tareas de mantenimiento que realizan con el objetivo de alcanzar un fin; al seguir las normas y reglas para ello establecido. Aparecen en este nivel el *TPM*, *RCM*, *TPM* & *RCM* combinadas, *PMO*, reactiva, proactiva, clase mundial, *RCM Scorecard*, entre otros.

2.3.3.3.4 Nivel 4 - Estratégico (Conjunto de Funciones y Acciones mentales)

El campo estratégico está compuesto por las metodologías que se desarrollan con el fin de evaluar el grado de éxito alcanzado con las tácticas desarrolladas; esto implica el establecimiento de índices, rendimientos e indicadores que permitan medir el caso particular con otros de diferentes industrias locales, nacionales o internacionales. Es la guía que permite alcanzar el estado de éxito propuesto y deseado. Se alcanza mediante el *LCC*, el CMD, los costos, la Terotecnología, etc.

2.3.4 Estructura, relaciones y elementos

El enfoque sistémico permite entender que la forma como se debe abordar el estudio y análisis del tema de mantenimiento, es de manera estructural, es decir que tiene un orden y una secuencia; de esta manera se facilita su entendimiento, su aplicación y la ejecución de operaciones, tácticas y estrategias a nivel empresarial.

La estructura se da en el caso particular al tener una serie de elementos (mantenedores, productores y máquinas) organizados e independientes, que se relacionan entre sí de una manera formal con reglas y niveles identificables.

2.3.4.1 Relaciones

Los elementos mantenimiento, producción y máquinas se relacionan entre sí a partir de premisas y normas de aceptación universal, así: la relación entre productores (producción) y máquinas la establecen los principios de la

---

[102] *AOD - Aprovisionamiento Operación Distribución.*
[103] *Acciones, operaciones, o tareas que se dan en el nivel 2 operacional de mantenimiento.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

confiabilidad[104], la relación entre mantenedores (mantenimiento) y máquinas se define por las reglas de la mantenibilidad, la relación entre mantenedores y productores se da por una relación indirecta a través de los equipos y está gobernada por los cánones de la disponibilidad, esta última relación muestra que cuando las conversaciones entre producción y mantenimiento son sobre las máquinas, puede ser mucho más fluida, que cuando se da en forma directa entre los dos departamentos sobre otros temas que no se refieren a CMD, de aquí que en ocasiones existen conflictos directos entre las dos áreas, esto muestra que siempre y cuando las conversaciones se den en términos de equipos y de sus comportamientos, la relación es más sencilla y eficaz.

La confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad, son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas, fundamentadas en cálculos matemáticos, estadísticos y probabilísticos, que tiene el mantenimiento para su análisis (Mora, 2007b) y su evaluación integral y específica; es a través del CMD que se puede planear, organizar, dirigir, ejecutar y controlar totalmente la gestión y operación del mantenimiento.

Es curioso observar como la mayoría de las tácticas conocidas como *TPM*, *RCM*, proactiva, reactiva, clase mundial, *PMO*, *RCM* Scorecard, centrada en objetivos, basada en riesgos, terotecnológica, etc., fundamentan su establecimiento a partir de los indicadores CMD; los cuales proveen los principios básicos estadísticos y proyectivos de las dos manifestaciones magnas de mantenimiento: fallas y reparaciones. La mejor forma de controlar el mantenimiento y sus implicaciones es a través del componente confiabilidad y parámetros asociados (Barringer@, 2005).

La confiabilidad se mide a partir del número y duración de las fallas (tiempos útiles, reparaciones, tareas proactivas, etc.), la mantenibilidad se cuantifica a partir de la cantidad y de la duración de las reparaciones (o mantenimientos planeados (tareas proactivas según J. Moubray - *RCM* II); mientras que la disponibilidad se mide (o se obtiene por cálculo y deducción matemática) a partir de la confiabilidad y de la mantenibilidad.

La evolución del mantenimiento permite determinar tres etapas: una inicial hacia la segunda guerra mundial donde mantenimiento actúa por avería en los equipos, donde no se requieren grandes habilidades, una segunda fase donde impera el mantenimiento preventivo y la reducción de costos, al prolongar la vida útil y el tercer período donde predomina la confiabilidad (Bleazard, y otros, 1998) y la disponibilidad del parque industrial con mayores niveles de seguridad para alcanzar altos valores de eficiencia.

Los estudios de fiabilidad[105] permiten llegar a niveles de óptima confiabilidad, que producen mínimos costos del ciclo de vida para el usuario y minimizan los costos para el fabricante, sin comprometer confiabilidad y calidad (Reliasoft@, 2008).

Una mayor comprensión de las fallas de dispositivos ayuda en la identificación de las mejoras que pueden introducirse en los diseños de los productos, para aumentar su vida o por lo menos para limitar las consecuencias adversas de las fallas.

La terminación o degeneración de la propiedad de un elemento para realizar su función, se define como falla, esto incluye:

- Falla completa, al perder disponibilidad y funcionalidad.
- Falla parcial, sin generar la pérdida total de disponibilidad.
- Falla que se encuentra durante la realización de reparaciones, mantenimientos planeados, inspecciones o pruebas, que implique la realización de otra reparación.
- Fallas en aparatos de seguridad o elementos de control y monitoreo.
- La degradación paulatina de la funcionalidad del elemento después de cierto límite establecido como referencia con antelación al hecho.

No se estiman como fallas: la realización de tareas planeadas de mantenimiento[106], la interrupción de la

---

[104] El término asociado a confiabilidad en inglés es Reliability, pues también existe la palabra Dependability en el inglés que está asociada al CMD, pero es de un significado más supra, así al traducirla aparezca también como confiabilidad. Parece ser que Dependability está más asociada a la confiabilidad de la organización a que pertenezca la empresa a la cual se le evalúan equipos. También es importante señalar que en este libro los términos fiabilidad y confiabilidad son asumidos como idénticos.

[105] En castellano se puede decir que las expresiones fiabilidad y confiabilidad denotan lo mismo.

[106] Otra cosa es si durante un mantenimiento planeado aparece una falla, en ese caso se consideran eventos independientes, cada uno con su respectivo tiempo de prevención o

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

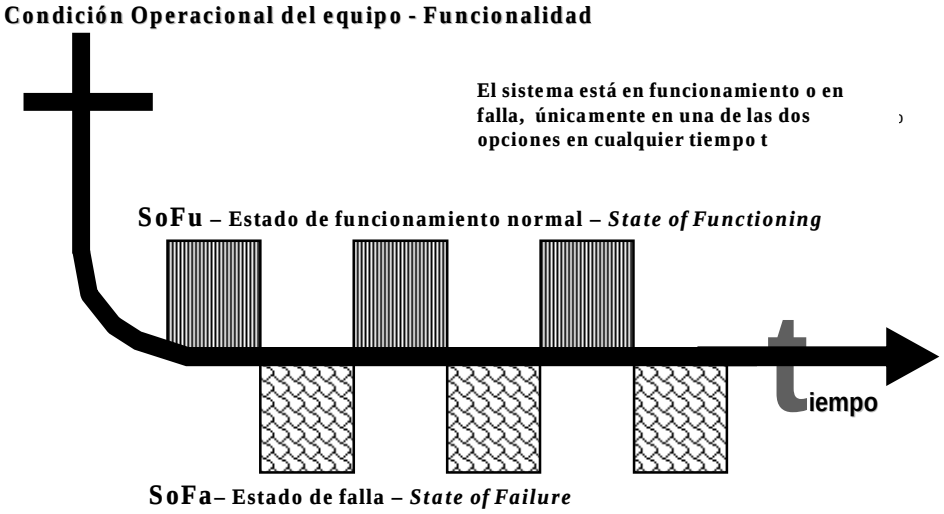
funcionalidad de un elemento o máquina causada por un factor externo y exógeno a la operación del mismo.

Las fallas se clasifican internacionalmente como críticas[107] (*critical*), degradantes[108] (*degraded*), incipientes[109] (*incipient*) y desconocidas (*unknown*) dependiendo del efecto que generan sobre el cuerpo o la función del equipo (OREDA, 2002) (OREDA, 1997).

La confiabilidad se puede entender como una característica propia del diseño de máquinas, que permite estudiar mediante principios científicos y matemáticos, las fallas de los elementos de los equipos, para el análisis de los procesos de un diseño, la determinación de los costos del ciclo vida y la seguridad de un producto (Nachlas, 1995). Además se utiliza en el análisis de datos operativos para el mantenimiento, permitiendo conocer el comportamiento de equipos en operación con el fin de aislar componentes con problemas, diseñar las políticas de mantenimiento, calcular instantes óptimos de sustitución económica de equipos y establecer frecuencias de ejecución del mantenimiento preventivo (Díaz, 1992).

En todo caso la confiabilidad es una propiedad de las máquinas, que solo la lee o interpretan los seres humanos, así como la mantenibilidad es responsabilidad de los seres humanos, indiferente de que se use como una característica de las máquinas. En síntesis confiabilidad se asocia a máquinas y mantenibilidad a personas de mantenimiento. La falla de un sistema, se define como un evento que provoca la pérdida total o parcial de la capacidad de un equipo para realizar las funciones para las cuales se diseña. Un aparato, una máquina o un dispositivo se puede encontrar en uno de los dos posibles estados (mutuamente excluyentes): funciona o está en falla[110]. Durante la vida útil el elemento se alterna entre *SoFa*[111] y *SoFu*[112]. Los estados del equipo se denominan perfil de funcionalidad (Knezevic, 1996).

Ilustración 28 - Diagrama de estados de un equipo (perfil de funcionalidad)



El desarrollo de las técnicas de confiabilidad comienza en la segunda guerra mundial, como una respuesta a los rápidos desarrollos tecnológicos y a las intensas exigencias sobre los equipos. Se atribuye a Werner Von Braun la realización de los primeros estudios sistemáticos de confiabilidad cuando, en un intento por mejorar la eficacia de los cohetes V-1 y V-2, analiza sistemáticamente la causa de las fallas e incorpora sus resultados en diseños mejorados. Al final de la segunda guerra mundial, los estudios de confiabilidad se desarrollan bastante debido a la guerra fría, la carrera espacial y el desarrollo de la industria nuclear.

Los estudios de confiabilidad se realizan sistemática y rutinariamente en el diseño de equipos y sistemas, con la

predicción y de reparación respectivamente.

[107] *Causan pérdida completa de funcionalidad y disponibilidad del equipo o dispositivo.*

[108] *No son críticas, pero afectan las condiciones de la capacidad de producción; normalmente evolucionan a críticas con el tiempo o uso.*

[109] *No afectan ni la disponibilidad, ni la funcionalidad, ni la capacidad de producción, pero pueden transformarse en degradantes con el tiempo sino se realiza la eliminación de la causa de falla.*

[110] *Existen otros casos, de estados parciales de falla, que se analizan con otras ciencias o metodologías como NHPP o HPP.*

[111] *SoFa - State of Failure - Estado de Falla.*

[112] *SoFu - State of Function - Estado de Funcionamiento normal.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

idea de mejorar la calidad de los productos. Por ejemplo, antes de la construcción del metro de Caldas, las compañías francesas responsables emprenden intensos estudios de confiabilidad que les permiten garantizar que el producto terminado esté razonablemente libre de fallas mayores. La mantenibilidad es una medida vital para la predicción, evaluación, control y ejecución de las tareas correctivas o proactivas[113] de mantenimiento; permite mejorar los tiempos y las frecuencias de ejecución de acciones de reparación o mantenimiento en las máquinas (Mora, y otros, 2003). La disponibilidad es una herramienta útil en situaciones en las que se tienen que tomar decisiones con respecto a la adquisición de un elemento entre varias posibles alternativas (Knezevic, 1996).

Entre las ventajas del estudio científico y matemático del CMD, resalta que pretende buscar una metodología adecuada para medirlas y evaluarlas eficazmente, con el fin de brindar una herramienta fácil de usar para controlar la gestión y operación integral del mantenimiento, a la vez que permite predecir el comportamiento futuro de corto plazo de los equipos, en cuanto a fallas, reparaciones, tiempos útiles, etc.

En resumen, la confiabilidad se asocia a fallas, la mantenibilidad a reparaciones y la disponibilidad a la posibilidad de generar servicios o productos.

2.3.4.2 Interacción – CMD

La forma en que se realiza la estimación de cada uno de los indicadores relacionales del sistema de mantenimiento y producción, como son la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad es amplia y diversa; la literatura universal sobre el tema provee diversas formas y métodos, en la cual se encuentran también elementos y principios comunes, las diferentes estimaciones aportan metodologías disímiles o afines en otros casos (González, 2004).

En síntesis, lo importante en la metodología CMD, consiste en poder predecir el comportamiento futuro de los equipos, en cuanto a saber sobre: las fallas o las reparaciones (tiempos y fechas de ocurrencia), los tiempos útiles (duración y días en que ocurrirán), los mantenimientos planeados (para su programación en tiempos y frecuencias) y demás actividades alusivas a la planeación de las máquinas, en aras de poder establecer planes concretos de operación y efectividad.

2.3.4.3 Métodos de predicción CMD:

En el mundo de las predicciones CMD, existen varias alternativas, que difieren en su metodología y en su fundamentación técnica, aunque persiguen lo mismo, unas son más adecuados que otros en función del entorno y de las características del grado posible o no de reparación de los elementos, como también del grado de madurez técnico y científico de las personas o de la empresa que los utiliza, sobresalen entre otros muchos modelos, los siguientes:

- PUNTUAL - Métodos de cálculo puntuales (o promedios): se basa en el establecimiento de promedios de cada uno de los parámetros de fallas, reparaciones, tiempos útiles y demás variables a calcular, su utilización es muy simple y adecuada para personas o empresas que en su vida no han practicado con este tipo de previsiones de parámetros CMD. Sus resultados no son muy aceptables[114], pero es muy útil para aprender a dominar los algoritmos de cálculo de cada una de las diferentes opciones de disponibilidad.

- DISTRIBUCIONES - Métodos de distribuciones: utiliza los mismos conceptos de disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad del modelo puntual anterior, pero en vez de utilizar promedio de los valores de tiempos útiles, de fallas, de mantenimientos planeados, de demoras, utiliza diferentes distribuciones que modelan mucho mejor que un simple el comportamiento de las variables CMD en el tiempo y de sus parámetros. En general es un buen procedimiento aplicable tanto a elementos o

---

[113] *Tareas proactivas: mantenimientos planeados, como son preventivos o predictivos.*

[114] *Está demostrado hasta la saciedad, a nivel mundial, que utilizar los promedios o medias móviles para pronosticar es un adefesio intelectual, normalmente estas herramientas solo se utilizan para alisar en los modelos de pronósticos, sus resultados infieren que todos los eventos o intervalos de tiempo son iguales, lo que en la realidad no es cierto ((Ladiray, y otros, 2000); de ahí su poca credibilidad, pero en general es una buena metodología para aprender a manejar los conceptos de CMD y sus algoritmos en las diferentes opciones de disponibilidad.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

máquinas reparables o no; aunque algunos autores no lo recomiendan para artefactos reparables; pero en general tiene muy buena aceptación mundial, es de aplicación sencilla y el autor aporta programas en Excel, adjuntos, que facilitan su utilización en las diferentes distribuciones que usa para la diferentes disponibilidades que se presentan en el libro.

- HPP & NHPP - Métodos de modelos HPP o NHPP: para predecir sistemas reparables (que se pueden restaurar al fallar, como motores, compresores, etc.) también se usan los modelos de: Proceso Homogéneo de Poisson (*HPP*[115]) y Proceso No Homogéneo de Poisson (*NHPP*[116]). Algunos autores sostienen que los modelos tradicionales de distribuciones como Weibull[117], Gamma, LogNormal, etc., que se usan en los sistemas no reparables[118], no son tan adecuados para pronosticar el comportamiento de los sistemas reparables, por lo cual sugieren ampliar el espectro de metodología, como por ejemplo con el modelo de NHPP (O´Connor, 2002).

- SERIES TEMPORALES – Método de previsión con el uso de técnicas de Series Temporales: esta metodología se basa en la utilización de modelo universal de pronósticos, con sus tres etapas del método científico: análisis previo, lanzamiento de hipótesis y verificación, entre las metodologías que trabaja, usa: modelos clásicos (Tendencia lineal o no, *Brown*, *Holt*, *Holt´s Winter*) y modelos estocásticos *AR.I.MA.* (*Auto-Regressive, Integrated, Moving Average*), que son muy efectivos y garantizan errores mínimos en los pronósticos frente a la realidad futura. Se pueden usar directamente sobre la predicción de las fallas, de las reparaciones, de los mantenimientos, de los tiempos útiles, etc. o sobre las predicciones de cada una de las variables de modelación CMD, tales como[119] *MTTR*, *MTBF*, *UT*, *DT*, $MTBM_C$, $MTBM_P$, M_P, etc. En general sus resultados son bastante confiables y veraces. Se basan en la modelación de eventos en el tiempo, utilizan el medio científico para encontrar las diferentes funciones clásicas o modernas que simulen mejor el comportamiento pasado, presente y futuro de los datos históricos. Tienen la capacidad de generar predicciones basadas netamente en el pasado o pueden predecir hechos futuros que no estén relacionados directamente con los datos del pasado, y este es su gran aporte, cuando se usan los Modelos *AR.I.MA.*, con la Metodología Box-Jenkins.

- OTROS _ Combinaciones de los anteriores u otros: de hecho se pueden combinar dos o más de los anteriores para lograr una modelación predictiva, como también se puede recurrir a otros modelos que tengan un buen grado de validez científica para predecir el comportamiento futuro de las máquinas (Mora, 2007c).

El *HPP*, que describe el Proceso Homogéneo de Poisson, se dice que alcanza este grado de homogéneo cuando su comportamiento no está en función del tiempo, es decir el número de eventos solo depende del período de tiempo del intervalo que se evalúe. La probabilidad futura de ocurrencia de cualquier evento próximo no obedece a la conducta de los eventos anteriores, ni está en función del tiempo. Su comportamiento se rige por la siguiente expresión.

Ecuación 1 - HPP

$$HPP \qquad R(t_{1,} t_2) = e^{-l*(t_2 - t_1)}$$

Donde:

t_1, t_2 es el intervalo de tiempo que se analiza
λ, es la Tasa de Fallas, independiente del tiempo

El *NHPP*, que se refiere al proceso No Homogéneo de Poisson, es similar al *HPP*, solo que la Tasa de Fallas - λ - está en función del tiempo. El proceso no es estacionario, ni en media ni en varianza, dado que la función de tasa de fallas tampoco es estacionaria, λ no es independiente y no se distribuye de manera uniforme a través del tiempo. Su modelación se realiza con el siguiente algoritmo.

---

[115] HPP - Homogeneus Poisson Process
[116] *NHPP – Non-Homogeneus Posisson Process*
[117] *Investigador de origen sueco*
[118] *Un sistema no reparable, es aquel que al fallar, es sustituido, descartado o reemplazado por otro que funciones adecuadamente.*
[119] *MTTR: Mean Time To Repair, MTBF: Mean Time Between Failures, UT: Up Time, DT: Down Time,* $MTBM_C$*: Mean Time Between Corrective Maintenance,* $MTBM_P$*: Mean Time Between Planned Maintenance, etc.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ecuación 2 - NHPP

$$NHPP \qquad R(t_{1,} t_2) = e^{\int_{t_1}^{t_2} l(t) * dt}$$

Donde:
t_1, t_2 es el intervalo de tiempo que se revisa
λ, es la Tasa de Fallas, dependiente del tiempo

(Bajaria, 1983)

Existen diferentes métodos para analizar los datos de las fallas, entre otros, están: el estadístico, el probabilístico y el determinista. Lo primero que se hace en los procedimientos NHPP y HPP es definir si existe o no una tendencia. Esto se logra estadísticamente con diferentes pruebas como el *ACF* (Prueba de Auto-Correlación) o con la prueba del Centroide o de Laplace.

La existencia o no de la tendencia define si los datos se correlacionan entre sí, o si son independientes o aleatorios, como también si los valores de intervalos en el tiempo se distribuyen de manera uniforme. Cuando hay tendencia, los valores de las fallas pasadas y futuras no son independientes, no son aleatorios y no se distribuyen de manera similar en los diferentes intervalos de tiempo (Palencia, y otros, 2006).

Para los Modelos puntual y de distribuciones, el autor propone un modelo universal para el manejo del CMD (Confiabilidad - Mantenibilidad - Disponibilidad) y aporta una metodología única y sintética que permite estimar los diferentes parámetros de una forma única y lógica, de tal manera que los sistemas de medición CMD que se implementen en las diferentes empresas, permitan una comparación similar en el tiempo, ya sea con la propia industria o con otras a nivel internacional, el manejo de la obtención del CMD debe cumplir unos parámetros estadísticos y matemáticos a lo largo del cálculo. El modelo propuesto en la siguiente ilustración, parte de la premisa de que los valores pueden ser pronosticados al inicio en cuanto a los tiempos de falla, tiempos útiles, períodos de mantenimientos planeados, tasas de fallas o de reparaciones, etc. o al final del proceso mediante el pronóstico de los parámetros CMD asociados calculados como el βeta, Eta *η*, *MTTF*, *MTBF*, *MTTR*, entre otros.

También es importante resaltar que el cálculo se realiza inicialmente con la distribución Weibull que permite la utilización de las tres zonas de tasa de fallas o sea para cualquier βeta; para luego acorde al valor de este parámetro obtenido se realiza la validación de los cálculos, para posteriormente compararlos con otras distribuciones congruentes con el valor βeta que se calcule. De resto, se usan prácticamente las metodologías estadísticas y procedimientos universalmente aceptados en el cálculo y estimación integral CMD, en el modelo propuesto por el autor; pero en todo caso se pretende una sola ruta de cálculo que permita de una manera fácil la comparación dinámica de resultados, que es el objetivo del manejo estratégico y sistémico del mantenimiento y, de la producción.

2.4 Disponibilidad [120]

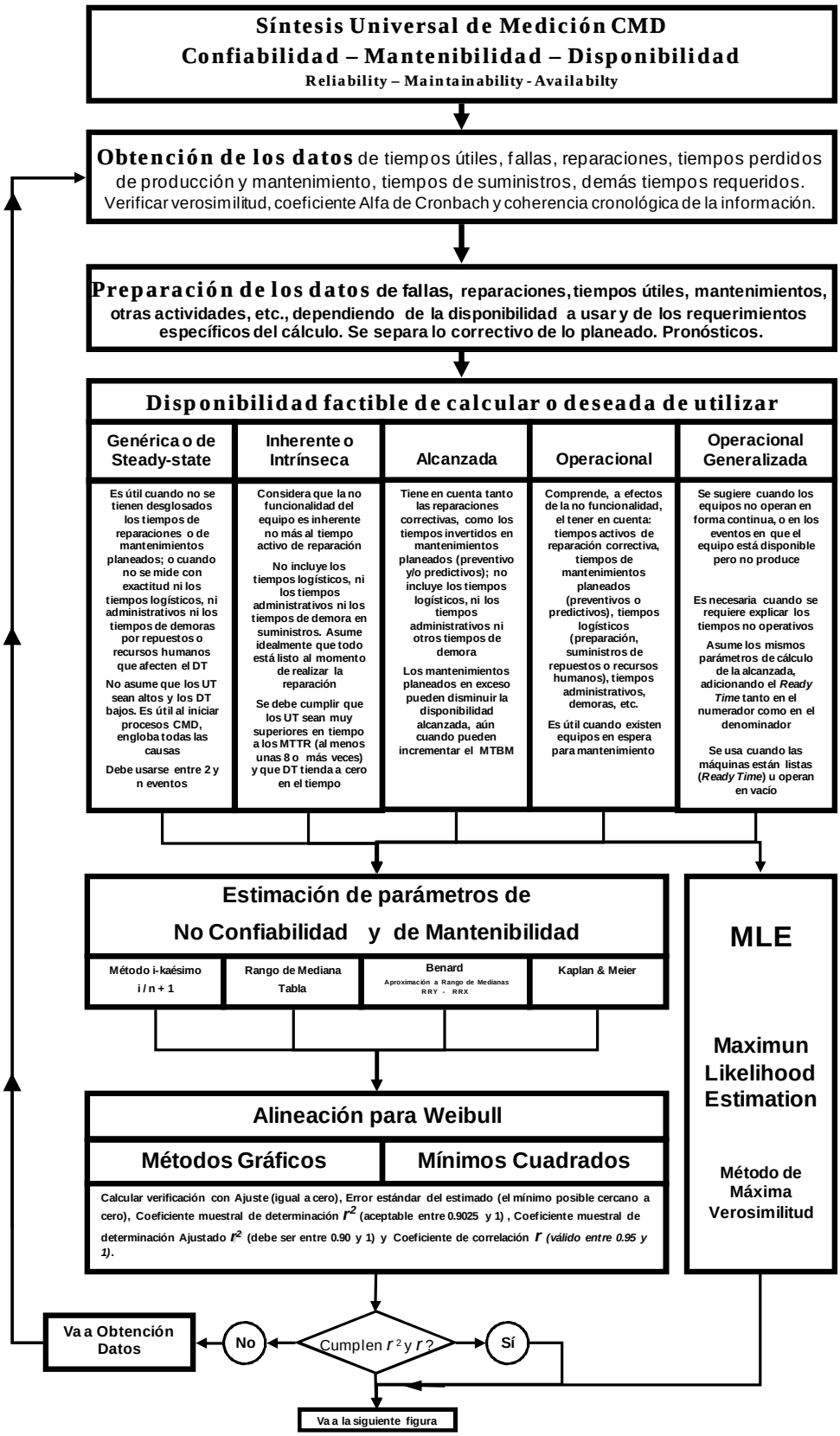
La probabilidad de que el equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables, donde el tiempo total considerado incluye el tiempo de operación, tiempo activo de reparación, tiempo inactivo, tiempo en mantenimiento preventivo (en algunos casos), tiempo administrativo, tiempo de funcionamiento sin producir y tiempo logístico se define como disponibilidad (Ramakumar, 1996)(Blanchard, 1995)(Nachlas, 1995)(Smith, 1983) (Leemis, 1995)(Kececioglu, 1995)(Díaz, 1992)(Knezevic, 1996) (Ebeling, 2005) (Kelly, y otros, 1998) (Kapur, y otros, 1977) (Rey, 1996)(Halpern, 1978) (Navarro, y otros, 1997) (Modarres, 1993).

Es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un equipo. La mayoría de los usuarios aseguran que necesitan la disponibilidad de un equipo tanto como la seguridad. Hay varios métodos para lograrlo, uno es construir un equipo que cuando falle sea fácil de recuperar, y el otro es que sean confiables, y por lo tanto, demasiado costosos(Knezevic, 1996).

[120] *La traducción en inglés es Availability (Babylon@, 2008)*

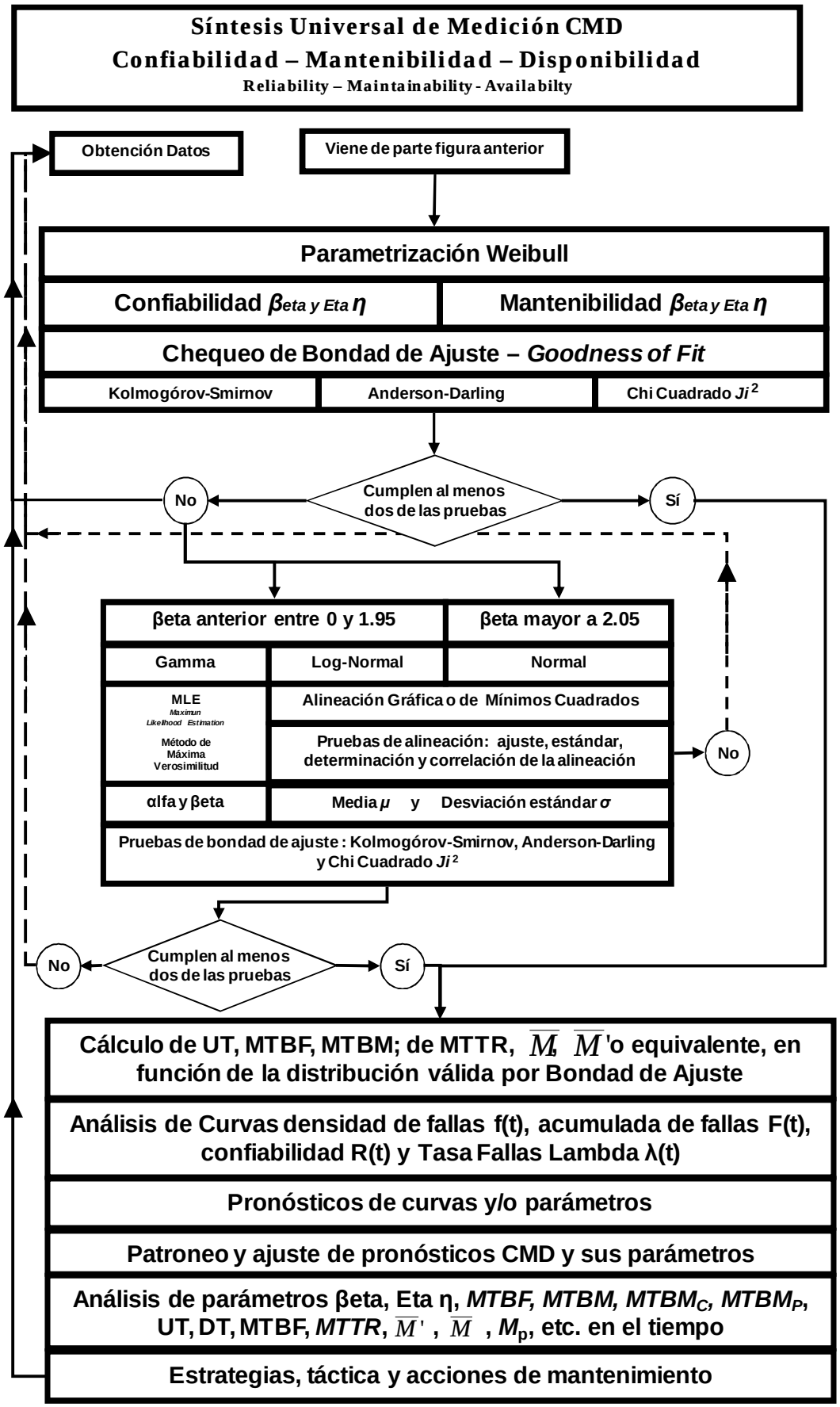
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 29 - Modelo universal e integral, propuesto para la medición CMD[121]



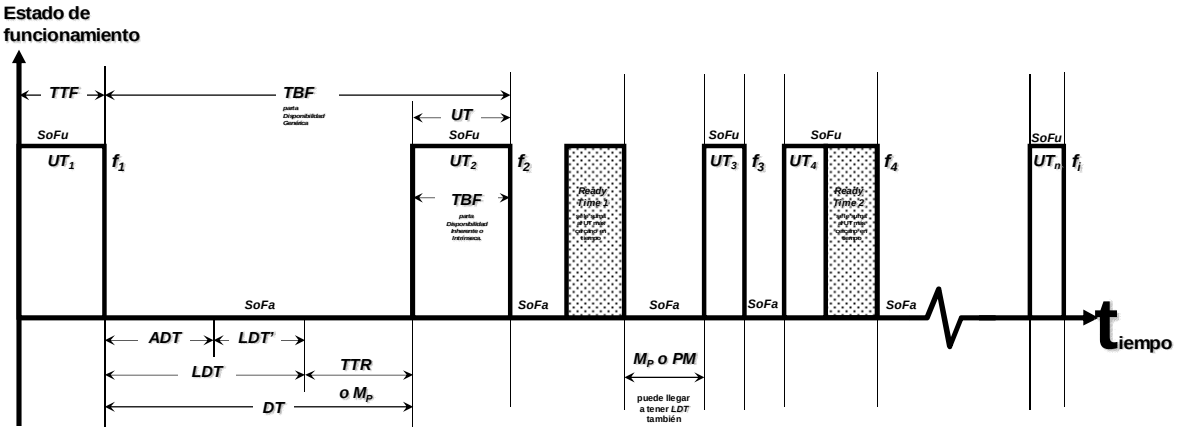
[121] *Válido para Modelos puntual y de distribuciones*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 30 - Tiempos importantes, siglas y demás convenciones que se usan en la medición y predicción CMD



Donde

TTF = Time To Failure = Tiempo hasta Fallar (se usa en equipos que solo fallan una vez, no reparables)
f_i = Falla i-ésima
n = número de fallas ocurridas en el tiempo que se revisa, desde f_1 hasta f_i.
TTR = Time To Repair = Tiempo que demora la reparación neta, sin incluir demoras ni tiempos logísticos, ni tiempos invertidos en suministros de repuestos o recursos humanos
MTTR = Mean Time To Repair = Tiempo Medio para Reparar = Σ TTR / n
TBF = Time Between Failures = Tiempo entre Fallas
m = número de eventos de tiempos útiles que ocurren durante el tiempo que se evalúa
MTBF = ***Mean Time Between Failures =*** Tiempo Medio entre Fallas = Σ TBF / m
UT = Up Time = Tiempo Útil en el que equipo funciona correctamente.
MUT = Mean Up Time = Tiempo Medio de Funcionamiento entre Fallas = Σ UT / m
DT = Down Time = Tiempo no operativo
MDT = Mean Down Time = Tiempo Medio de Indisponibilidad o no funcionamiento entre Fallas = Σ DT / n
ADT = Administrative Delay Time = retrasos administrativos exógenos a la actividad propia de reparación, diferentes al tiempo activo neto de la reparación; ejemplos de estos son: suministro de personal especializado, entrenamiento de recursos humanos requeridos para esa reparación, revisión de manuales de mantenimiento u operación, localización de herramientas, cumplimiento de procesos y/o procedimientos internos, etc.
LDT' = Logistics Delay Time = retrasos logísticos la obtención de insumos para la reparación, en los procesos de mantenimiento o de producción, en los tiempos de suministros, etc. como por ejemplo el tiempo requerido para transporte de repuestos, o el tiempo que hay que esperar a que se construya un repuesto especial por parte de los fabricantes, etc.
LDT = ADT + LDT' = Logistic Down Time = Tiempo total logístico que demora la acción propia de reparación o mantenimiento. Son todos los tiempos exógenos al equipo que retrasan el tiempo activo
MLDT = Mean Logistics Down Time = Tiempo Medio de Tiempos Logísticos de demora
SoFa = State of Failure = Estado de Falla, el equipo no funciona correctamente
SoFu = State of Functioning = Estado de Funcionamiento correcto
M_P = PM = Planned Maintenances = Mantenimientos Planeados, pueden ser preventivos o predictivos.
Ready Time = Tiempo de Alistamiento = el equipo o sistema está disponible, opera pero no produce, no está en carga operativa; funciona mas no produce

(Mora, 2007a)

La disponibilidad es una consideración importante en sistemas relativamente complejos, como plantas de energía, satélites, plantas químicas y estaciones de radar. En dichos sistemas, una confiabilidad alta no es suficiente, por sí misma, para asegurar que el sistema esté disponible para cuando se necesite (O´Connor, 2002).

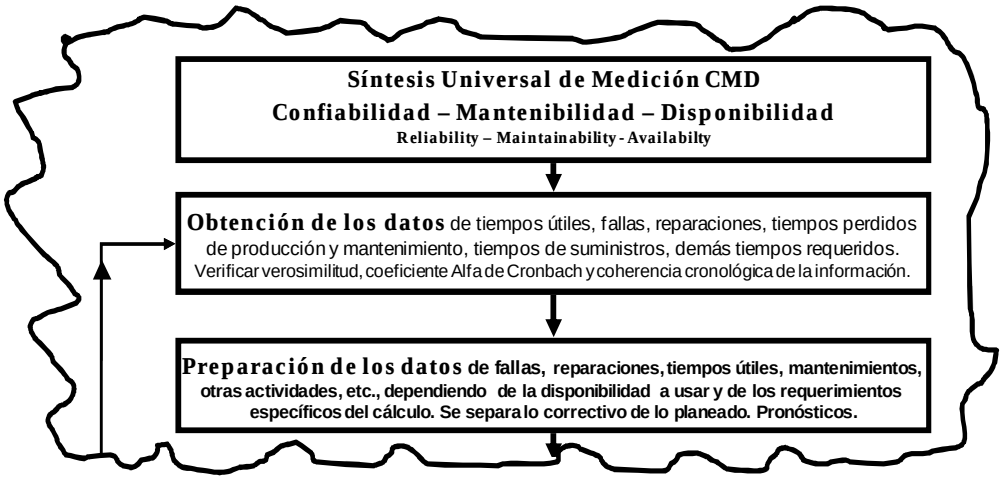
También es una medida relevante y útil en casos en que el usuario debe tomar decisiones para elegir un equipo entre varias alternativas. Para tomar una decisión objetiva con respecto a la adquisición del nuevo equipo, es necesario utilizar información que abarque todas las características relacionadas, entre ellas la disponibilidad, que es una medida que suministra una imagen completa sobre el perfil de funcionalidad (Nachlas, 1995)(O´Connor, 2002)(Mora, 2007b).

2.4.1 Modelo Universal para pronosticar CMD

El método internacional, se conforma de varias etapas, en la primera de ellas se dedica a definir los pasos claves para la obtención, tabulación, manipulación y tratamiento de los datos; con el fin de que sean compatibles en su forma, estilo y composición básicos para los cálculos en los métodos puntual y de distribuciones.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 31 - Primera etapa de datos, para la predicción CMD



En la segunda fase, se debe decidir la disponibilidad más adecuada acorde a los datos que se posean y a las expectativas de la empresa, acorde a los elementos que desea controlar, todas difieren y prestan diferentes servicios, en síntesis sus ventajas, son:

- Disponibilidad Genérica, sirve para organizaciones que no predicen ni manejan CMD, la información que se dispone, solo contempla los tiempos útiles y los de no funcionalidad (sin especificar causa, ni razón, ni tipo). Es muy adecuada para inicializar pruebas pilotos en las empresas. Los parámetros que usa, son: *UT* y *DT*.

- Disponibilidad Inherente o Intrínseca, es muy útil cuando se desea controlar las actividades de mantenimientos no planeados (correctivos y/o modificativos). Solo contempla su posible uso cuando los promedios de tiempos útiles son supremamente grandes frente a los *DT* y los tiempos de retraso o demora administrativos o físicos son mínimos o tienden a cero (al igual las otras tres disponibilidades que siguen: Alcanzada, Operacional y Operacional generalizada). Sus parámetros son *MTBF* y *MTTR*. Solo tiene en cuenta daños o fallas o pérdidas de funcionalidad, por razones propias del equipo y no exógenas al mismo.

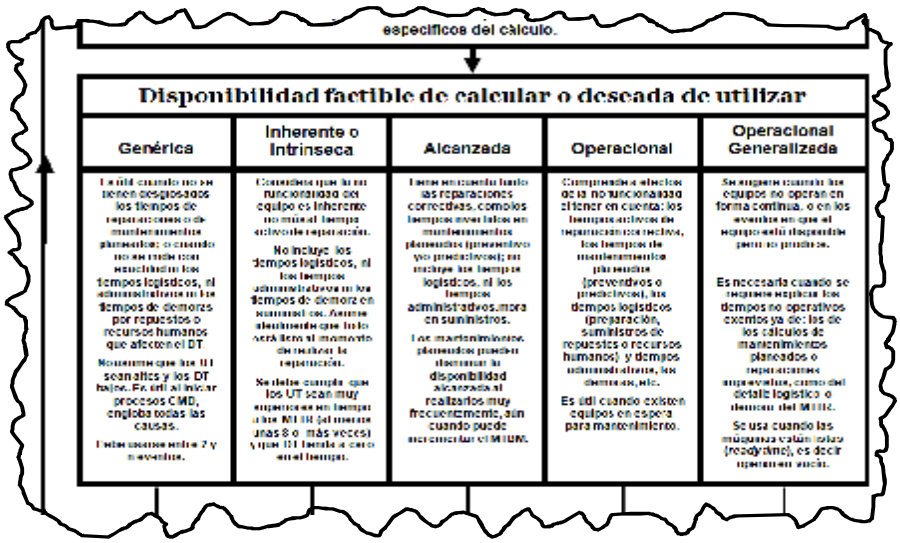
- Disponibilidad Alcanzada, es magnífica cuando se desean controlar las tareas planeadas de mantenimiento (tareas proactivas: preventivas o predictivas) y las correctivas por separado, no le interesan los tiempos de espera (demora), ni los registra obligatoriamente. Es muy rigurosa en el manejo y especificación de la información y de los datos, requiere un manejo detallado y preciso. Usa como parámetros de cálculo, a: $MTBM$, $MTBM_C$, $MTBM_P$, $MTTR$, M_P, $\overline{M}$, etc.

- Disponibilidad Operacional, es adecuada cuando se desea vigilar de cerca los tiempos de demoras administrativas o de recursos físicos o humanos, trabaja con las actividades planeadas (preventivas o predictivas) y no planeadas (correctivas o modificativas) de mantenimiento, en forma conjunta. Es precisa, exigente y metódica para su predicción. Su implementación requiere mucho esfuerzo y exige bastantes recursos económicos. Utiliza los mismos parámetros de la anterior Alcanzada más los correspondientes a demoras: *ADT*, *LDT'* y *LDT*.

- Disponibilidad Operacional Generalizada, básicamente se usa cuando se predice el CMD en equipos con mucho tiempo de operación en que funcionan mas no producen, algo así como trabajar en vacío, por ejemplo una turbina de generación a carga mínima, un compresor de aire al mínimo, una bomba de agua en recirculación por no tener carga, un vehículo detenido y encendido pero en neutro en su caja de cambios. Trabaja con los mismos parámetros de la Operacional, solo que los tiempos en que la máquina funciona, pero que no produce (denominados en inglés *Ready Time*) se les agrega a los tiempos útiles más cercanos en fecha; para de esta manera aumentar los tiempos útiles que si no se registrasen los *Ready Time*. Es la más compleja y completa de las disponibilidades, pero así mismo la más exigente y costosa de implementar, aparte de que la empresa debe tener ya mucha experiencia en el tema.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

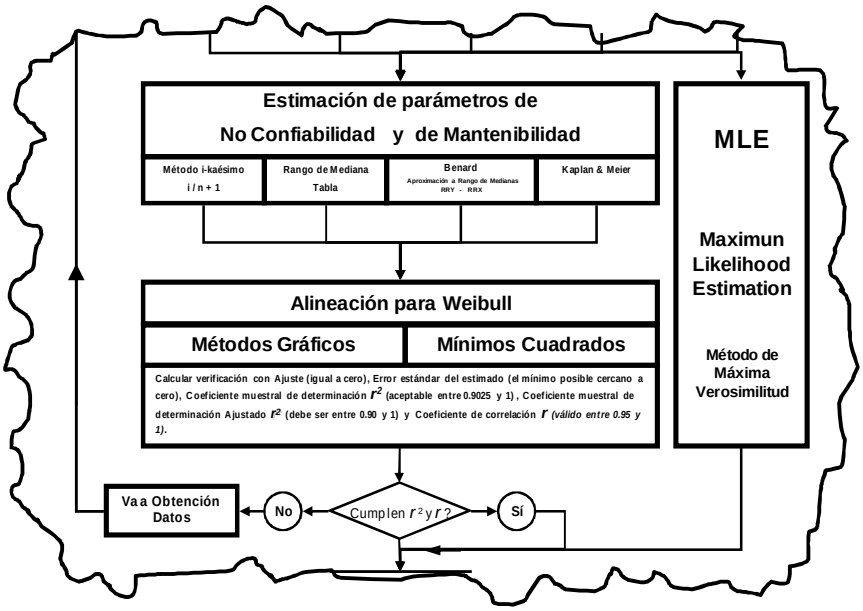
Ilustración 32 - Etapa dos de selección de disponibilidad a usar en predicción CMD



Para completar con la tercera fase, debe tomar la decisión de si utiliza el método directo de Máxima Verosimilitud que no hace alineación, o si se resuelve usar el método de alineación con sus dos facetas: estimación de parámetros $F(t)$[122] (función de no confiabilidad) y de M(t) de mantenibilidad), con las opciones que se muestran (i-kaésimo, Rango de Medianas con Tablas, de Benard (de aproximación de rango de mediana) o Kaplan & Meyer) y luego la alineación para la función de Weibull (en dos versiones: gráfica o numérica de mínimos cuadrados o de regresión) que permite hallar todos los parámetros requeridos para estimar *UT*, *DT*, *MTBF*, *MTBM*, $MTBM_C$, $MTBM_P$, *MTTR*, M_P, etc., en función de la disponibilidad que se usa.

En ambas opciones de la tercera etapa (sea para el método de máxima verosimilitud o el de Weibull) se deben comprobar los valores de ajuste que se obtienen, mediante la valoración de los índices de bondad de ajuste: *r* (coeficiente de correlación múltiple) y r^2 (coeficiente de determinación muestral); que sirven para saber el grado de ajuste de los resultados que se obtienen en cualquiera de los casos.

Ilustración 33 - Etapa tres de parametrización y alineación de Weibull, o de uso de MLE[123]



La cuarta fase se trata de los cálculos en sí y de las pruebas de bondad de ajuste de Weibull, que se realiza con tres pruebas: Kolmogórov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi cuadrado Ji^2.

El gran aporte de esta Metodología Universal propuesta es que directamente desde el inicio usa la metodología de Weibull que sirve para las tres etapas de la curva de Davies (o de la bañera): infancia, rodaje y envejecimiento (igual que la de Hjorth) y, en el evento en que no sirve se va directamente a la función específica (Gama, Normal, LogNormal, Rayleigh, etc.) que más se adecua con el valor del βeta que se obtiene en esa etapa de Weibull, lo cual garantiza mayor precisión y rapidez en la estimación futura del CMD.

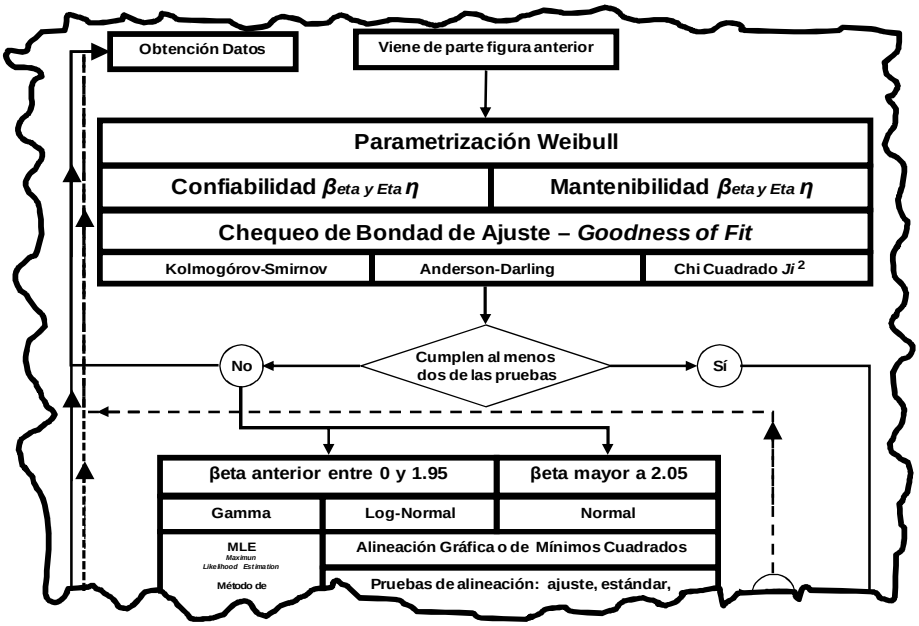
---

[122] *Del inglés Failures, su opuesto es confiabilidad y por eso se le llama de No Confiabilidad, que es similar a fallas o de no funcionalidad, para un estado de SoFa (State of Failure).*

[123] *MLE - Maximun Likelihood Estimation*

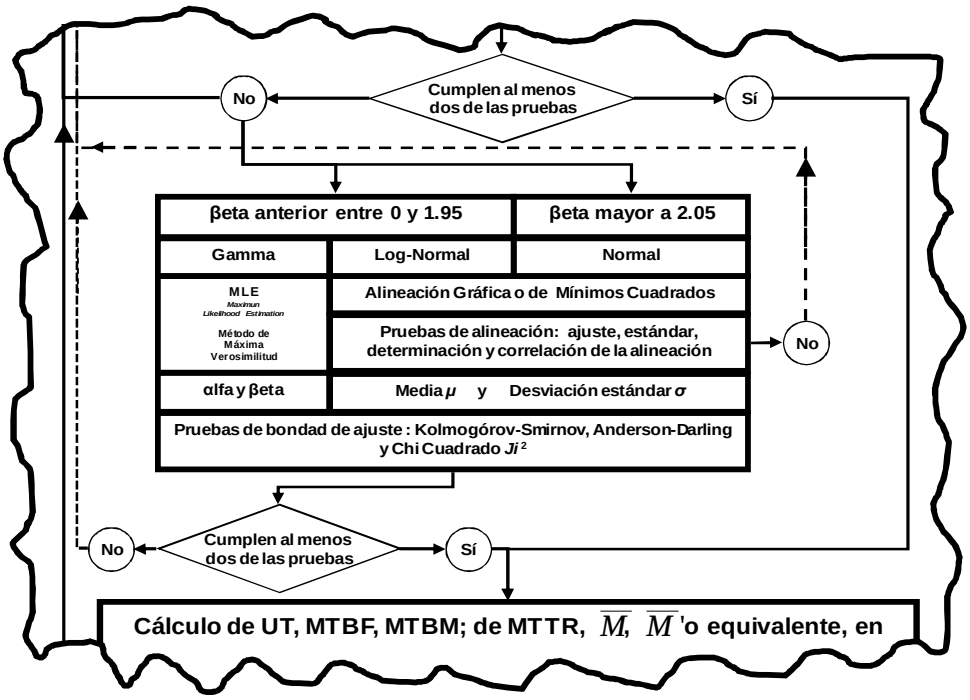
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 34 - Cuarta fase de validación de ajuste y bondad de Weibull o búsqueda de otra función



La quinta etapa sirve para parametrizar y realizar la alineación o MLE, que se requiere con otra función diferente a Weibull, como para estimar sus bondades de ajuste.

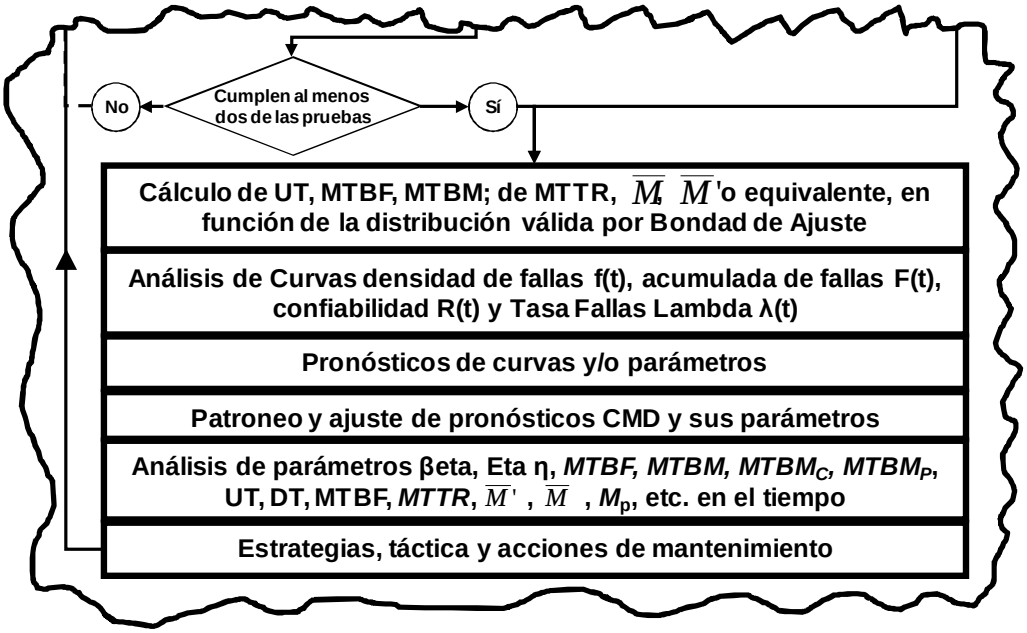
Ilustración 35 - Etapa cinco, para parametrizar y alinear o MLE de otra función



En la etapa seis, se realizan todos los cálculos CMD, con la función que se seleccione y cumpla bien todos los ajustes.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 36 - Etapa seis de cálculos, predicciones y estrategias CMD



Cualquier eficiencia, en el ámbito empresarial, se mide a partir de los siguientes conceptos: el total es lo bueno más lo no bueno para el fin que se persigue, lo bueno es la cifra que se adecua a la meta que se desea y lo no bueno, es la medida de las fines que no alcanzan a cumplir con el nivel de los parámetros, que se plantean como requisitos para calificarlos como buenos.

Ecuación 3 - Eficiencia general de cualquier índole

$$Eficiencia = \frac{Metas\ que\ cumplen\ o\ sea\ lo\ bueno}{Metas\ que\ cumplen\ o\ sea\ lo\ bueno + Lo\ no\ bueno\ o\ sea\ lo\ que\ no\ cumple}$$

Si se hace la analogía con los términos de la ecuación anterior y el CMD, se determina que lo bueno es la Confiabilidad, lo no bueno es la Mantenibilidad, de donde se deduce que se puede establecer una fórmula genérica de CMD, así:

Ecuación 4 - Relación de disponibilidad

$$Disponibilidad = \frac{Confiabilidad}{Confiabilidad + Mantenibilidad}$$

Donde interactúan los tiempos útiles *UT* y los tiempos de fallas debidas a reparaciones (imprevistas) *DT* o a mantenimientos planeados M_P, como de otros tiempos relevantes en la disponibilidad o no de las máquinas.

Se puede aproximar la medición de disponibilidad, a la relación entre:

Ecuación 5 - Relación de disponibilidad

$$Disponibilidad = \frac{Tiempo\ en\ que\ el\ dispositivo\ opera\ correctamente\ y\ funciona\ bien}{Tiempo\ en\ que\ el\ elemento\ o\ máquina\ puede\ operar}$$

2.4.1.1 Diferentes Disponibilidades, de mayor uso empresarial

La modelación y predicción del CMD, de la disponibilidad se puede realizar mediante diversas técnicas, desde unas muy simples que se basan en indicadores puntuales e instantáneos, que se calculan independientemente de la estimación de probabilidades, mediante medias móviles y de las leyes que modelan el CMD, hasta otras más complejas donde sí se tienen en cuenta las distribuciones que simulan el comportamiento de la confiabilidad y de

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

la mantenibilidad, hasta llegar al uso de simulaciones tipo Montecarlo o de los procesos *HPP* y *NHPP*, como también con el uso de series temporales, como se comenta en párrafos anteriores.

Al igual existen diferentes disponibilidades de distintos autores y de diferentes instituciones mundiales que tratan el mantenimiento, en el caso particular se muestran y se usan las cinco descritas en la Ilustración 29 - Modelo universal e integral, propuesto para la medición CMD: Genérica, Inherente (o Intrínseca), Alcanzada, Operacional y Operacional Generalizada.

Ecuación 6 - Disponibilidad Genérica sin mantenimientos preventivos- A_G

$$A_G = \frac{Media\ de\ los\ Tiempos\ Útiles\ con\ Funcionamiento}{Media\ de\ Tiempos\ Útiles\ +\ Media\ de\ los\ tiempos\ de\ No\ funcionalidad} = \frac{\dfrac{\sum_{i=1}^{m} UT_i}{m}}{\dfrac{\sum_{i=1}^{m} UT_i}{m} + \dfrac{\sum_{j=1}^{n} DT_j}{n}}$$

Donde:

UT: tiempos útiles o *Up Time*

DT: son los tiempos en que la máquina ni funciona ni produce, en inglés *Down Time*

m es el número de eventos de *UT*

n, es el número de no funcionalidades *DT*

Además se asume que no hay acciones planeadas M_P dentro de los tiempos de *DT*.

La disponibilidad genérica en este caso se mide en porcentaje, mientras que *UT*, *DT*, *MUT* y *MDT* se miden en unidades de tiempo: horas, minutos, entre otros.

2.4.1.1.1 Disponibilidad Genérica - D_G[124]

Es muy útil cuando se tienen los tiempos totales de funcionamiento y de no funcionalidad, los cuales se miden en forma global (no discrimina los tiempos correctivos, preventivos, predictivos, las demoras o los Ready time), los *DT* se miden al bulto, en este caso no se poseen los tiempos exactos de demoras logísticas, suministros, retrasos, acciones correctivas ni modificativas, tiempos planeados, otros. Es muy útil para empresas principiantes en el tema de predicción del CMD.

Los *MUT* en la A_G solo consideran los tiempos en que el equipo funciona correctamente, como a su vez los *MDT* contemplan todo lo que genere no disponibilidad o no funcionalidad, los tiempos de paradas previstas o planeadas por mantenimiento (u otra causa) deben descontarse del tiempo en que el equipo puede operar. Por ejemplo en el evento en que se tuviera un equipo que tiene tiempo útil *UT*, otro tiempo *DT* por fallas que generan reparaciones y además de lo anterior se tiene tiempo invertido en *PM* mantenimiento preventivo, con un tiempo total *TT*, se calcula así, la disponibilidad (Vallejo, y otros, 2004):

Ecuación 7 - Disponibilidad Genérica con mantenimientos preventivos

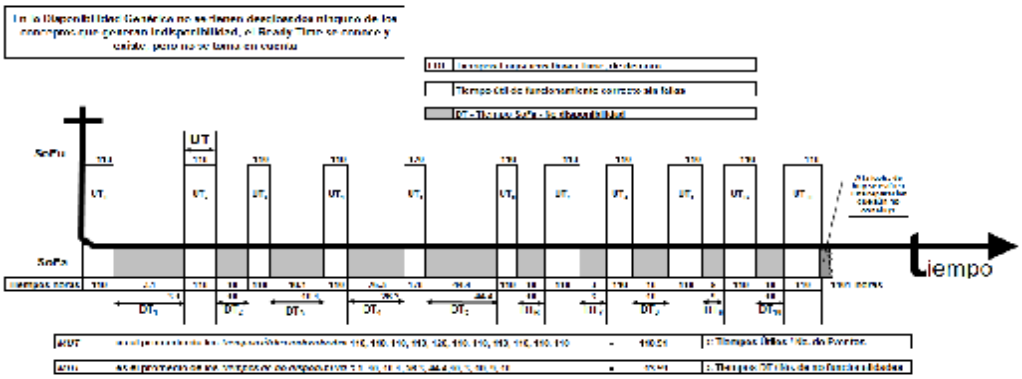
$$A_G = \frac{Tiempo\ Funcionamiento}{Tiempo\ en\ que\ puede\ operar} = \frac{\mathrm{TT} - \sum \mathrm{PM} - \sum \mathrm{DT}}{\mathrm{TT} - \sum \mathrm{PM}}$$

Si durante los tiempos de mantenimiento preventivo aparece una falla se consideran como hechos independientes el PM y la reparación, tratándose como eventos diferentes.

[124] *En ingles Generic Availability - A_G. En castellano Disponibilidad Genérica D_G.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ejemplo 1 - Disponibilidad Genérica (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_G



$$\boxed{Disponibilidad\ Genérica\ = A_G = \frac{MUT}{MUT + MDT} = \frac{110.91}{110.91 + 13.59} = 89.08\ \%}$$

Para poder utilizar cualquiera de las otras disponibilidades: Intrínseca o Inherente, Alcanzada, Operacional u Operacional Generalizada, se deben cumplir varias cosas:

El *MUT* debe ser infinitamente superior al *MDT*, al menos unas diez veces.

Los tiempos logísticos *ADT* y *LDT´* deben tender a cero o no existen, con lo cual *LDT* tiende a ser mínimo, cero o no hay.

Ambas situaciones sucede en las empresas muy maduras u organizadas en mantenimiento y en el área de ingeniería de fábricas. En las siguientes ecuaciones se vislumbra la transformación de *MTBF* y de *DT*.

Ecuación 8 - Transformaciones de MTBF, UT, MTTR, DT, etc.

En la Disponibilidad Genérica se cumple que:

$MTBF = UT + DT$, pero si $UT >>>> DT$, entonces queda que $MTBF \cong UT$

$DT = LDT + MTTR$, con *LDT* despreciable o igual a cero, de donde $DT \cong MTTR$

Si ambos resultados se reemplazan en la Disponibilidad Genérica, esta se transforma en:

$$D_G = \frac{MUT}{MUT + MDT}, \quad \text{queda como} \quad D_{Inherente} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

De donde se deduce que los términos *MUT* y *MDT* son propios de la Disponibilidad Genérica, *MTBF* de la Disponibilidad Inherente o Intrínseca y *MTTR* de las Disponibilidades Intrínseca o Inherente, Alcanzada, Operacional y Operacional Generalizada.

Al asumir varias consideraciones, como: que el *MTTR* tiende en el tiempo a ser igual al *MDT*, que el *MTBF* es mucho mayor que *MTTR* (al menos unas 10 veces), que el tiempo total de análisis de eventos es muy largo y superior al menos a 10 veces el *MTTR*, que el *MLDT*[125] tiende a cero en el tiempo; se puede suponer como válido que:

[125] *MLDT – Mean Logistics Down Times – Tiempo medio de los tiempos logísticos, causados por demoras.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ecuación 9 - Equivalencias de UT con TBF y de DT con TTR

$$\frac{MUT}{MUT + MDT} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

De donde se puede asumir que $MUT \approx MTBF$, que es usado por algunos autores, debe recordarse que esto es válido solo bajo las premisas enunciadas.

Las modelaciones Markovianas simples y complejas de procesos estocásticos donde se representan los estados posibles de un sistema y las probabilidades de transición entre estos estados, al asumir que las probabilidades de transición entre estados posibles (funcionamiento u ocurrencia de falla con reparación) son constantes (hipótesis cierta solo en procesos de Poisson), al considerar que la Tasa de Fallas $\lambda(t)=1/MTBF$ y la Tasa de Reparaciones $\mu(t)=1/MTTR$ bajo hipótesis de comportamiento poissoniano[126] y resolver el sistema mediante ecuaciones diferenciales, permiten demostrar la validez de la disponibilidad en función de *MTBF* y *MTTR* (Díaz, 1992), así:

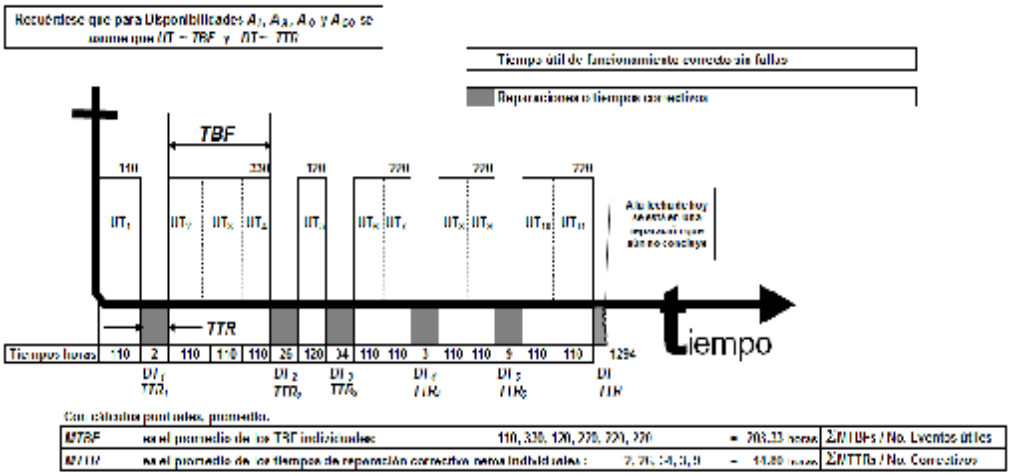
Ecuación 10 - Disponibilidad Inherente o Intrínseca - A_I [127]

$$\text{Disponibilidad Inherente} = A_I = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

2.4.1.1.2 Disponibilidad Inherente o Intrínseca - D_I

A_I del sistema, es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente cuando se requiere en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación especificadas y con un entorno ideal de soporte logístico, es decir, con la disponibilidad adecuada de personal, repuestos, herramientas, equipos de prueba y demás, sin considerar ninguna demora logística o administrativa (Blanchard, y otros, 1994) (Blanchard, 1995). El *MTTR* es el tiempo activo neto de reparación sin ninguna demora y con todos los recursos disponibles al iniciarse la reparación. La A_I no contempla los mantenimientos planeados (preventivos o predictivos). La disponibilidad inherente está basada únicamente en la distribución de fallas y en la distribución de tiempo de reparación (Ebeling, 2005). A_I se usa como un parámetro para el diseño (Hecht, y otros, 2001). Como su palabra lo expresa solo reconoce actividades de reparaciones inherentes al sistema, no exógenas.

Ejemplo 2 - Disponibilidad Inherente (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_I



$$\boxed{\textit{Disponibilidad Inherente} = A_I = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{203.33}{203.23 + 14.80} = 93.21\%}$$

[126] *Autor Simeón Denis Poisson (1781-1840), de origen francés.*
[127] *A_I - Inherent Availability – Disponibilidad Inherente o Intrínseca.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Las empresas que invierten tiempos relevantes en actividades planeadas de mantenimiento (preventivo y/o predictivo), pueden utilizar la Disponibilidad Alcanzada, que sí tiene en cuenta las tareas proactivas[128] de mantenimiento que generan no disponibilidad:

Ecuación 11 - Disponibilidad Alcanzada - A_A[129]

$$Disponibilidad\ Alcanzada = A_A = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}} = \frac{\dfrac{1}{\dfrac{1}{MTBM_C} + \dfrac{1}{MTBM_P}}}{\dfrac{1}{\dfrac{1}{MTBM_C} + \dfrac{1}{MTBM_P}} + \dfrac{\dfrac{MTTR}{MTBM_C} + \dfrac{M_P}{MTBM_P}}{\dfrac{1}{MTBM_C} + \dfrac{1}{MTBM_P}}}$$

Donde *MTBM* = *Mean Time Between Maintenance* o sea el Tiempo Medio entre Mantenimientos (tanto reparaciones correctivas o modificativas, como también mantenimientos planeados, sean de orden preventivo o predictivo) y $\overline{M}$ = *Mean Time active Maintenance*, *MTM* = *Mean Time Maintenance* = Tiempo Medio de Mantenimiento (correctivo y planeado).

El tiempo medio entre mantenimientos, *MTBM*, más que un índice de confiabilidad es un indicador de la frecuencia de los mantenimientos; es función de la frecuencia de los mantenimientos planeados (preventivos y/o predictivos) y no planeados (correctivos), en ausencia de mantenimiento preventivo el *MTBM* se aproxima al *MTBF* (Blanchard, y otros, 1994).

$$MTBM = \frac{1}{\dfrac{1}{MTBM_c} + \dfrac{1}{MTBM_p}}$$

Con *MTBMc*, como el tiempo medio entre mantenimientos no planeados (correctivos o modificativos), se aproxima al *MTBF* en ausencia de tareas proactivas y el *MTBMp* como el tiempo medio entre mantenimientos planeados.

Ahora, para el cálculo del $\overline{M}$ se usa la expresión:

$$\overline{M} = \frac{\dfrac{MTTR}{MTBM_c} + \dfrac{M_p}{MTBM_p}}{\dfrac{1}{MTBM_c} + \dfrac{1}{MTBM_p}}$$

Donde,

MTTR = *Mean Time To Repair* = es el tiempo neto medio para realizar reparaciones o mantenimientos correctivos (o modificativos), sin incluir demoras logísticas, ni los retrasos administrativos, es el mismo que se define anteriormente.

M_P = es el tiempo neto medio para ejecutar tareas proactivas de mantenimientos planeados.

El $\overline{M}$ (*Mean Time active Maintenance*), es el tiempo medio de mantenimiento activo que se requiere para realizar cualquier tarea de mantenimiento. Es función de los tiempos medios de mantenimiento correctivo y planeados y sus frecuencias relativas; sólo considera los tiempos activos de mantenimiento y no tiene en cuenta los tiempos administrativos y tampoco los logísticos (Blanchard, y otros, 1994) (Vallejo, y otros, 2004), por demoras.

2.4.1.1.3 Disponibilidad Alcanzada - D_A

A_A, es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente, cuando se requiere en cualquier tiempo bajo condiciones de operación normales y en un entorno ideal de soporte logístico, sin considerar ningún retraso logístico o administrativo, pero involucra en sus cálculos, los tiempos imputables a las actividades planeadas de mantenimiento, aparte de las acciones correctivas que ya trae desde la Inherente o Intrínseca.

---

[128] *Definidas así por John Moubray en su libro RCM (Moubray, 2004).*
[129] *A_A - Achieved Availability – Disponibilidad Alcanzada.*

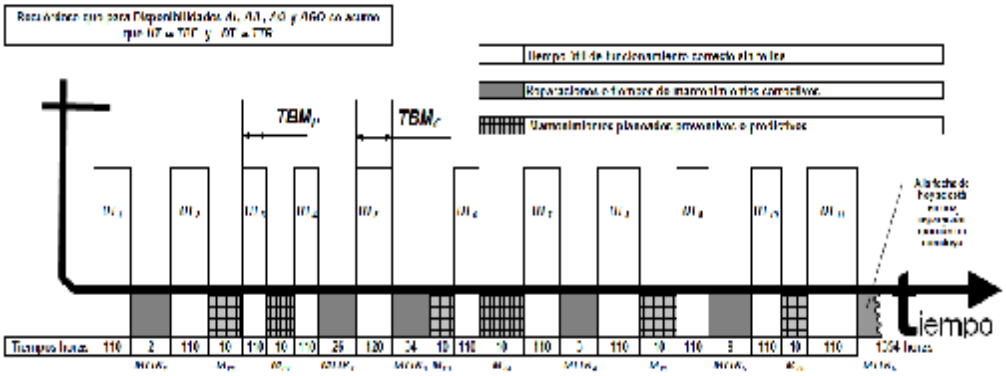
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Cuando se presente el caso especial de que durante la realización de una tarea proactiva o planeada (preventiva o predictiva) aparezca un daño que implique una reparación (o viceversa), se debe tomar la corrección (o modificación) como un evento independiente y considerarse los dos tiempos en forma aislada (Díaz, 1992), debido a que la reparación requiere de horas-hombre adicionales a las el mantenimiento preventivo, se puede manejar como un tiempo correctivo entre dos preventivos o simplemente tomar un preventivo por el tiempo invertido y otro correctivo o modificativo por la acción no planeada (o viceversa si se presenta o superpone un planeado, durante la ejecución de un correctivo o modificativo), pero en todo caso asumir los tiempos planeados y no planeados, en forma separada contabilizándolos por aparte, si se presentan en el mismo instante de tiempo.

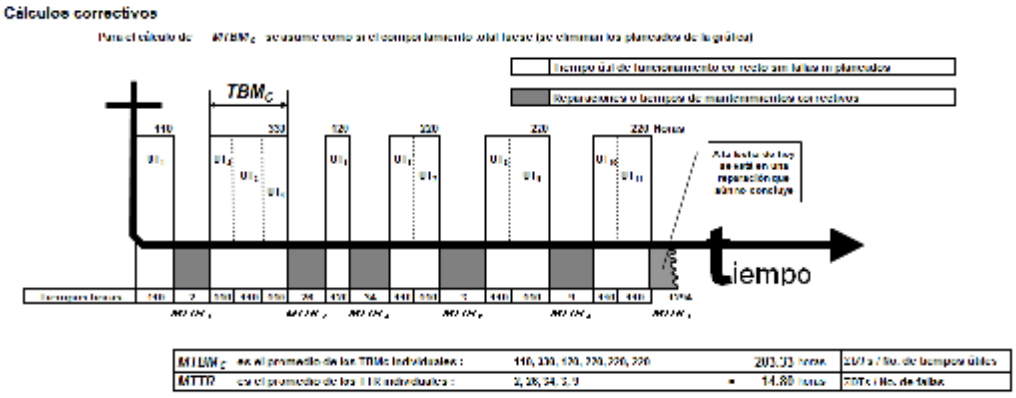
Recuérdese que en confiabilidad los tiempos útiles son inherentes al equipo o sistema, mientras que en mantenibilidad los tiempos de reparaciones o de tareas proactivas son inherentes al recurso humano[130] que las realiza.

A manera de ejemplo, se presenta el siguiente caso, donde los tiempos medios se valoran en forma puntual y no con simulaciones de distribuciones (que se desarrolla más adelante) que es lo que recomienda el autor. Recuérdese que en la Disponibilidad Alcanzada[131] prepondera la importancia de los mantenimientos planeados y los no planeados que se tienen desde Inherente.

Ejemplo 3 - Disponibilidad Alcanzada (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_A

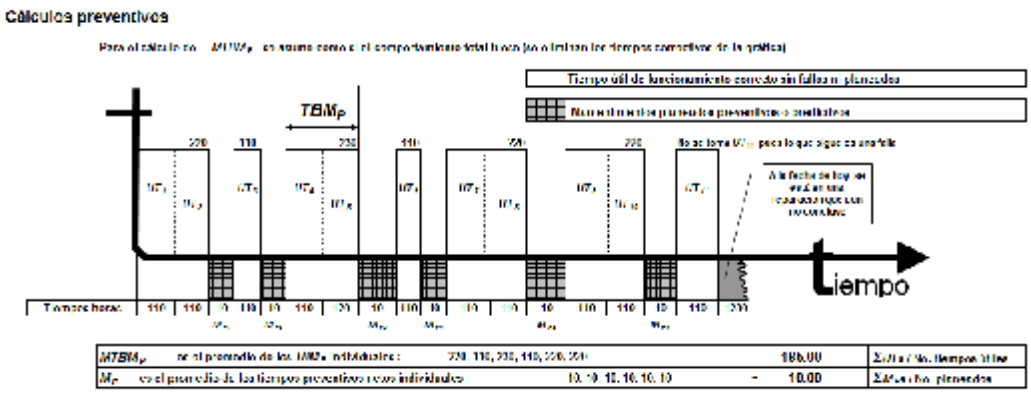


Una vez se configura la situación real de todos los parámetros de cálculo, como todos los *UT*, los *MTTR* y los M_P, se procede a elaborar dos gráficos, uno para los cálculos con acciones de mantenimiento no planeado (correctivos y/o modificativos) y, otro gráfico independiente con los mantenimientos planeados, cada uno solo con sus valores planeados o no, donde se mantienen en ambos casos los *UT* o *MTBF*.
El siguiente paso es separar los dos mapas: no planeado y planeados.



[130] *O grupos de personas que realizan las correcciones, modificaciones y/o las tareas proactivas.*
[131] *Achieved Availability, en inglés. En castellano se le denomina Disponibilidad Alcanzada*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_C} + \frac{1}{MTBM_P}} = \frac{1}{\frac{1}{203.33} + \frac{1}{185.00}} = 96.86 \ horas$$

$$\overline{M} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{\frac{14.80}{203.33} + \frac{10.00}{185.00}}{\frac{1}{203.33} + \frac{1}{185.00}} = 12.286 \ horas$$

$$Disponibilidad\ Alcanzada = A_A = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}} = \frac{96.86}{96.86 + 12.28} = 88.74\%$$

Nótese que la Disponibilidad D_A, es menor que la Disponibilidad Inherente D_I.

Si se tienen en cuenta los tiempos logísticos y administrativos de demoras, en la gestión del mantenimiento y en la operación de equipos, antes o después de una intervención correctiva o planeada, se debe considerar la disponibilidad operacional, que se expresa mediante:

Ecuación 12 - Disponibilidad Operacional - D_O - A_O[132]

$$Disponibilidad\ Operacional = A_O = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M'}}$$

Donde *MTBM* = *Mean Time Between Maintenance* es el Tiempo Medio entre Mantenimientos y se calcula igual que en la anterior D_A Disponibilidad Alcanzada tanto para reparaciones correctivas como para mantenimientos planeados, en este elemento no inciden para nada: *ADT*, *LDT'* ni *LDT*. Ya que los cambios en la fracción no se dan en el numerador que es la confiabilidad, solo afecta el denominador en la mantenibilidad, pues incrementa los *MTTR* y/o los M_P, en función de donde se presenten los *ADT*, los *LDT´* y los *LDT*, que aumentan los *MTTR* y los M_P.

El $\overline{M'}$ (que incluye los *LDT* = *ADT*[133] + *LDT'*[134]) se calcula exactamente igual que el $\overline{M}$, solo que al momento de calcular el *MTTR* no solo se toman los correspondientes TTR_1, TTR_2,…, TTR_n netos, sino que se le suman respectivamente sus *LDT* pertinentes a cada una de las reparaciones. Al igual al momento de calcular el M_P se le debe sumar a cada tiempo de mantenimiento planeado su respectivo *LDT* en caso de existir. Casi siempre las demoras ocurren antes del evento de mantenimiento, por eso por lo general se le suma al evento que co9ntinua de la acción de mantenimiento en el tiempo posterior o seguido; en algunas ocasiones ocurren demoras después de la acción de mantenimiento y antes de poner en marcha el equipo, en estos casos se le contabiliza a mantenimiento en

[132] *A_O – Operacional Availability en inglés y en castellano es la Disponibilidad Operacional.*
[133] *ADT, son los tiempos de demora administrativa.*
[134] *LDT, son los tiempos logísticos de demora para la realización de mantenimiento o reparación.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

sus respectivos *MTTR* o M_P y se le imputa a producción.

$$\overline{M}' = \frac{\dfrac{MTTR}{MTBM_c} + \dfrac{M_p}{MTBM_p}}{\dfrac{1}{MTBM_c} + \dfrac{1}{MTBM_p}}$$

$$MTBM = \frac{1}{\dfrac{1}{MTBM_c} + \dfrac{1}{MTBM_p}}$$

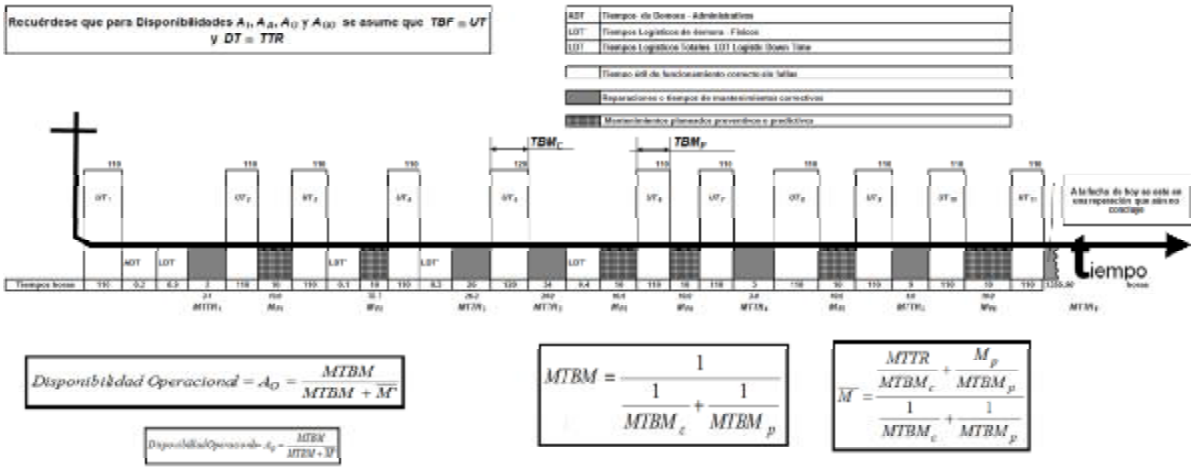
(Mora, 2007a)

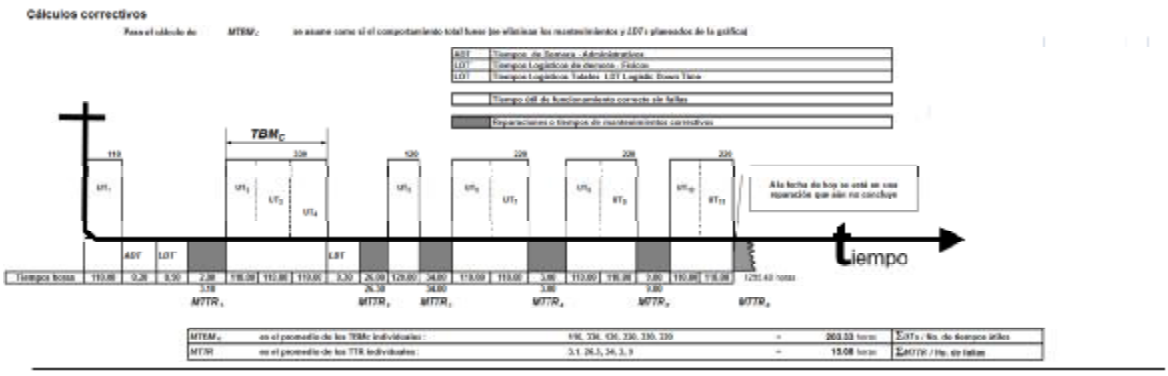
Ambos valores se calculan exactamente igual que en la Disponibilidad Alcanzada.

2.4.1.1.4 Disponibilidad Operacional - D_O

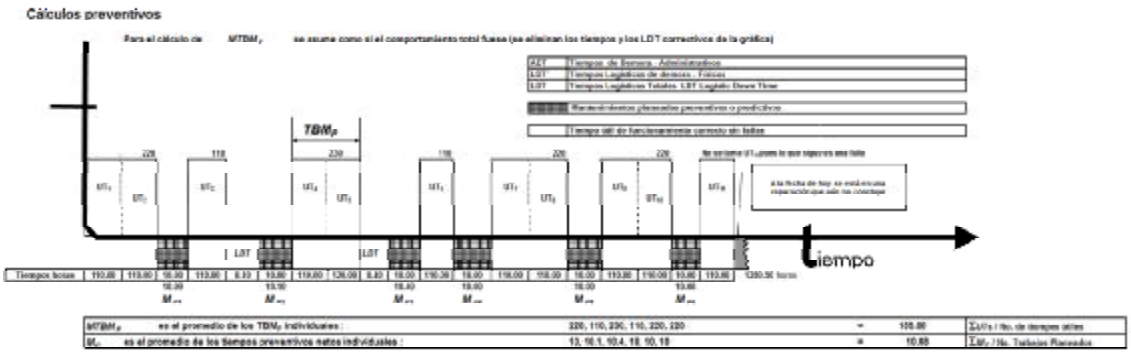
D_O es la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente, cuando se requiere que funcione bien en cualquier tiempo bajo condiciones de operación normales, en un entorno real de soportes logísticos y, abarca por lo tanto dentro de los tiempos de mantenimiento, los tiempos que se causan por los retrasos logísticos y administrativos, es decir, todos los tiempos concernientes al estado de reparación e, incluye el mantenimiento programado y no planeado. Le interesan todas las demoras, los mantenimientos planeados y los no planeados.

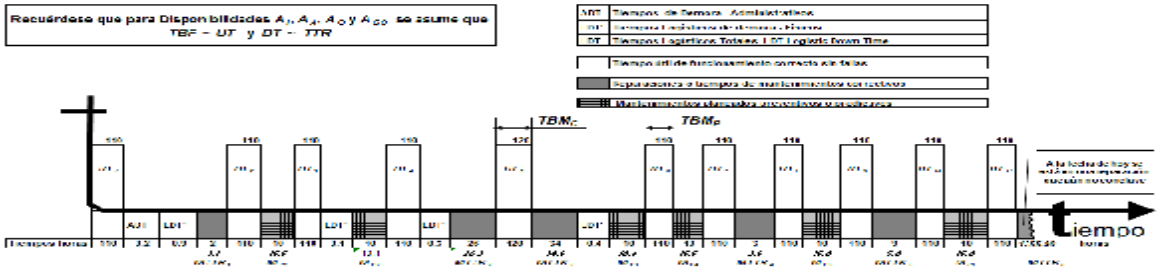
74 *Ejemplo 4 - Disponibilidad Operacional (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_O*





PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com





$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_C} + \frac{1}{MTBM_P}} = \frac{1}{\frac{1}{203.33} + \frac{1}{185.00}} = 96.86 \ horas$$

$$\overline{M'} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_P}{MTBM_P}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_P}} = \frac{\frac{15.10}{203.33} + \frac{10.08}{185.00}}{\frac{1}{203.33} + \frac{1}{185.00}} = 12.46372 \quad horas$$

$$Disponibilidad\ Operacional = A_O = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}'} = \frac{96.86}{96.86 + 12.48} = 88.59\ \%$$

Es menor que la D_A, ya que el denominador en la mantenibilidad entran los *LDT* y, es por los tiempos logísticos la diferencia entre A_O y A_A (89.59 – 88.74 %), que es del 0.75 %.

Los dispositivos, las máquinas, los sistemas y empresas que desean tener en cuenta en la disponibilidad, el tiempo en que el equipo está disponible pero no produce (*Ready Time*) pueden usar la disponibilidad Operacional Generalizada - D_{OG}.

Ecuación 13 - Disponibilidad Operacional Generalizada - A_{GO}[135]

$$Disponibilidad\ Operacional\ Generalizada = A_{GO} = \frac{MTBM'}{MTBM' + \overline{M}'}$$

El cálculo de *MTBM´* se realiza exactamente al de *MTBM de la D_O*, del caso anterior en la disponibilidad operacional, solo que los *Ready Time* se les suman a los tiempos útiles que los anteceden o siguen (el que esté más cercano), de tal forma que los tiempos útiles correspondientes se aumentan en el valor del tiempo del *Ready Time* y por ende aumenta también el $MTBM_C$ o $MTBM_P$ en cada caso, tanto en reparaciones (correctivos) como en las tareas proactivas (mantenimientos planeados), con lo cual aumenta entonces el $MTBM_C$ y el $MTBM_P$; razón por la cual la D_{OG} debe ser mayor que la D_O.

Los valores de *MTTR* y M_P no varían con respecto a los valores se calculan en D_O (disponibilidad operacional).

[135] *A_{GO} – Generalized Operacional Availability, en inglés. En castellano D_{GO} - Disponibilidad Operacional Generalizada.*

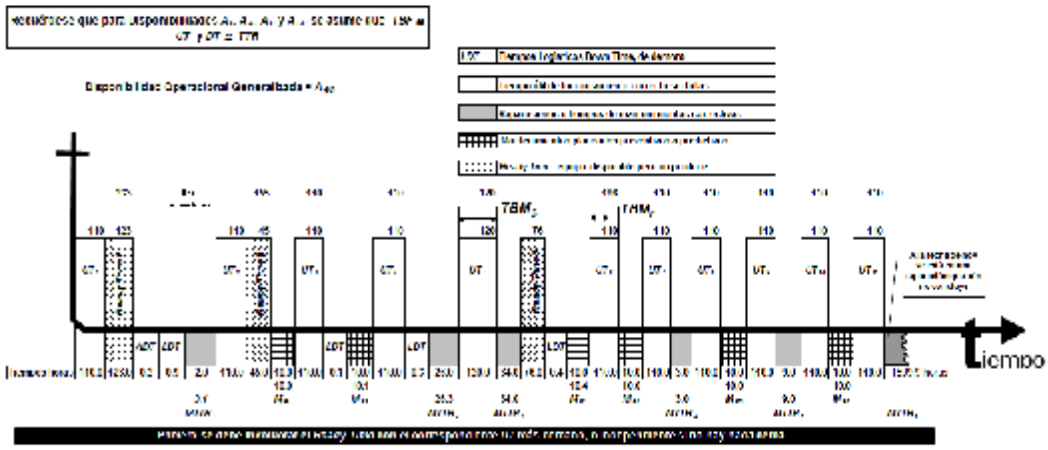
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

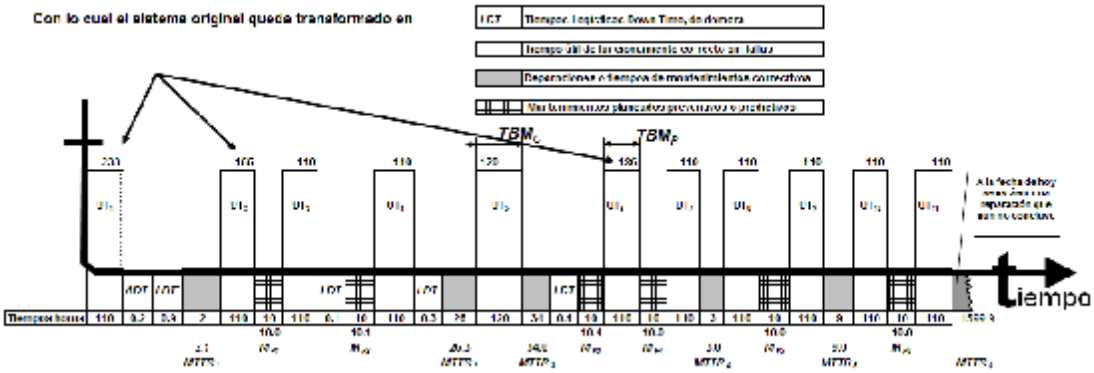
Se mantienen para la estimación numérica de A_{GO} o D_{GO}, todas las premisas y paradigmas de la operacional.

2.4.1.1.5 Disponibilidad Operacional Generalizada - D_{GO}

A_{GO}, es útil cuando los tiempos en que los equipos están disponibles y no producen, sirve para explicar estos lapsos de tiempo (Aven, 1999). La traducción de *Ready Time* no es exactamente literal en castellano, como tiempo de alistamiento, se entiende mejor como listo en el tiempo, listo para producir; en general significa que funciona adecuadamente mas no produce.

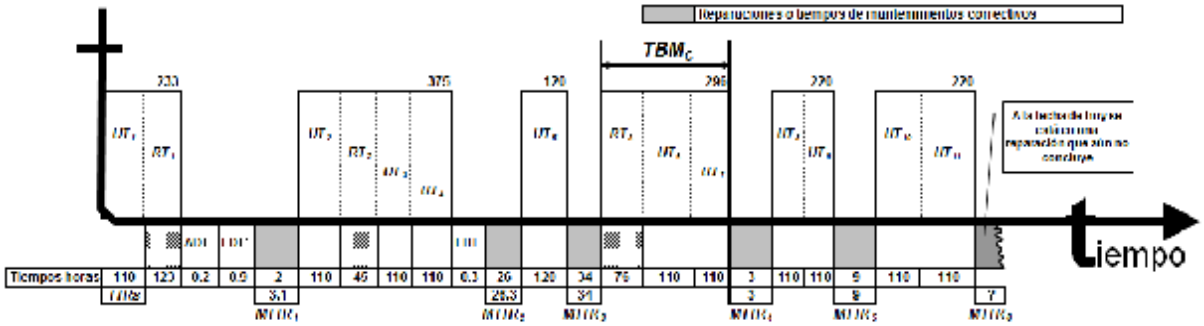
Ejemplo 5 - Disponibilidad Operacional Generalizada (cálculos puntuales sin distribuciones)- D_{OG}





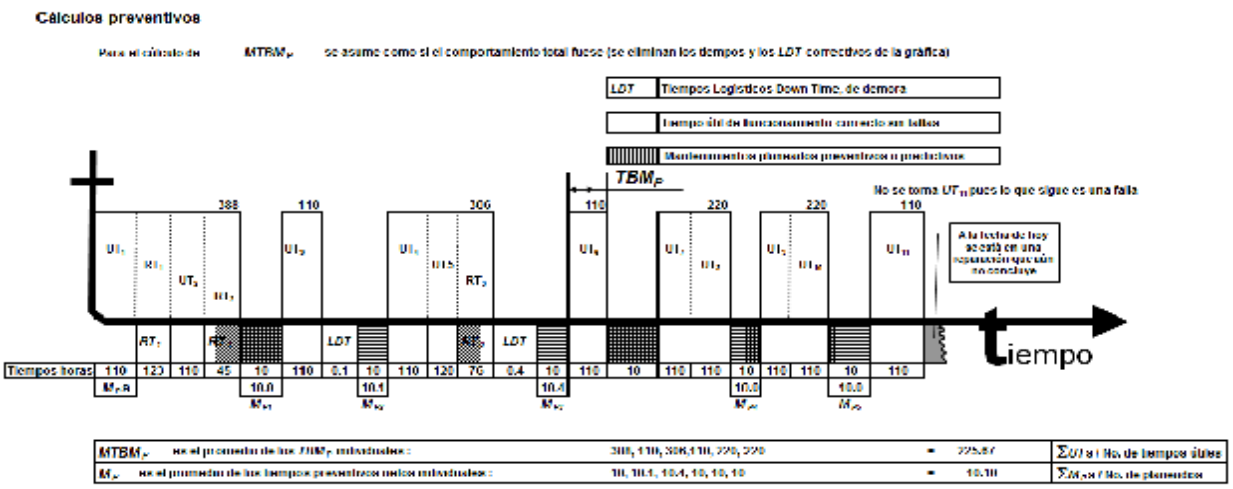
Cálculos correctivos

Para el cálculo de $MTBM_C$ se asume como si el comportamiento total fuese (se eliminan los mantenimientos y LDTs plancados de la gráfica)



$MTBM_C$	es el promedio de los TBMc individuales :	233, 375, 120, 296, 220, 220	244.00	ΣUTs : No. de tiempos útiles
MTTR	es el promedio de los TTR individuales :	3.1, 26.3, 34, 3, 9	= 15.08	ΣTTRs : No. de fallas

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_C} + \frac{1}{MTBM_P}} = \frac{1}{\frac{1}{244.00} + \frac{1}{225.67}} = 117.24 \ horas$$

$$\overline{M'} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{\frac{15.08}{244.00} + \frac{10.10}{225.67}}{\frac{1}{244.00} + \frac{1}{225.67}} = 12.4928 \ horas$$

$$Disponibilidad\ Operacional\ Generalizada = A_{GO} = \frac{MTBM\ (incluido\ Ready\ Time)}{MTBM\ (incluido\ Ready\ Time) + \overline{M'}}$$

$$Disponibilidad\ Operacional\ Generalizada = A_{GO} = \frac{117.24}{117.24 + 12.4928} = 90.37\ \%$$

Al tener en cuenta los tiempos disponibles (*MRT Ready Time*) se mejora la disponibilidad operacional en un 1.78%, que resulta de restar A_{OG} menos A_O (90.37% - 88.59%).

La diferencia entre la disponibilidad Inherente y la Alcanzada permite determinar el porcentaje en que se disminuye la disponibilidad debido a las tareas proactivas (mantenimientos planeados de orden preventivo o predictivo); en el ejemplo se determina que la disminución es del 4.47%, que es la resta de A_I menos A_A (93.21% - 88.74%).

En síntesis, con el mismo ejemplo se logran visualizar los cambios en la estimación de la disponibilidad, así:

Ilustración 37 - Ejemplos de diferentes disponibilidades

Disponibilidad	Símbolo		Valor
	Inglés	Castellano	
Genérica	A_G	D_G	89.08%
Inherente o Intínseca	A_I	D_I	93.21%
Alcanzada	A_A	D_A	88.74%
Operacional	A_O	D_O	88.59%
Operacional Generalizada	A_{OG}	D_{OG}	90.37%

Se observa que en la medida que se incorporan más conceptos de no disponibilidad cambia el valor de la disponibilidad (desde la A_A hacia A_O disminuye por los *LDT* y al llevarla a la A_{GO} mejora al aumentar los UT debidos al *Ready Time*), al igual mejora el índice de disponibilidad al considerar solo el tiempo activo de reparación neto en la A_I.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

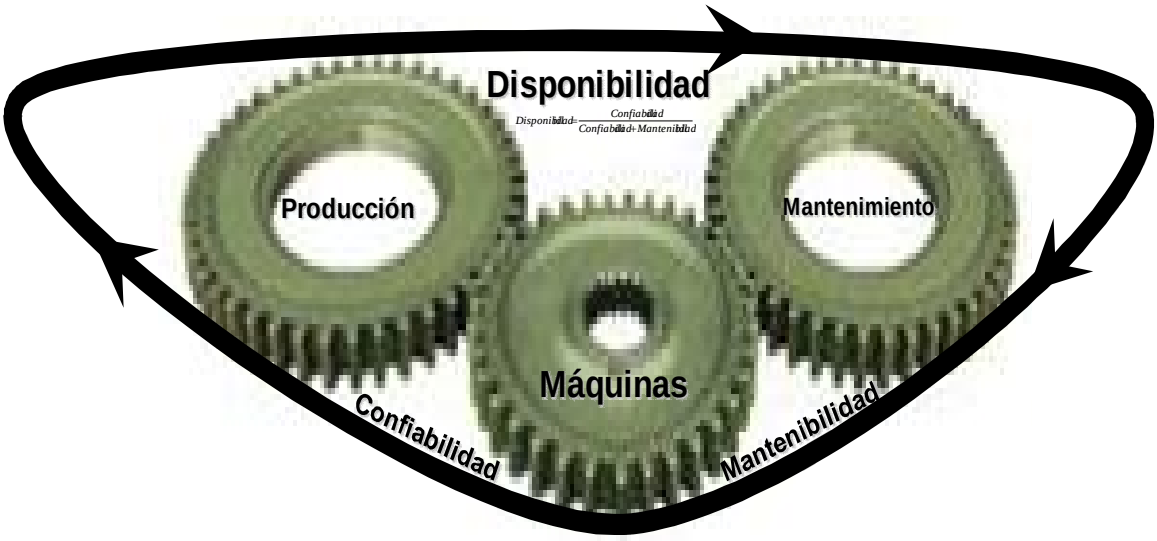
En síntesis se puede concluir que los diferentes factores que afectan la funcionalidad de los equipos son considerados por las distintas maneras de calcular la disponibilidad, ya cada empresa asume la que más le conviene, sobre todo adopta la que puede usar acorde a los datos que posee.

Ilustración 38 - Factores que afectan la funcionalidad de los equipos y las disponibilidades que los consideran

		Factores que disminuyen la funcionalidad del dispositivo, equipo o sistema						
		Tiempo de no disponibilidad *Down Time* de cualquier índole.	Fallas que implican reparación correctiva	Mantenimientos planeados Preventivos o Predictivos	Tiempos Administrativos	Retrasos Logísticos de insumos, repuestos o recursos humanos	Tiempos logísticos que generan indisponibilidad = suma de ADT + LDT'	*Ready Time*, tiempo en que el equipo está disponible pero no produce.
	Término	DT	TTR	PM	ADT	LDT'	LDT	RT
Disponibilidad que considera el concepto	Genérica A_G	X						
	Inherente A_I		X					
	Alcanzada A_A		X	X				
	Operacional A_O		X	X	X	X	X	
	Operacional Generalizada A_{GO}		X	X	X	X	X	X

Los conceptos, aplicaciones, demostraciones y fundamentos que se esbozan hasta el momento, dejan sentadas las bases para entender las relaciones y leyes existentes entre los elementos de un sistema de mantenimiento y las relaciones que los gobiernan, bajo un enfoque sistémico; todo con el fin de poder predecir el comportamiento del CMD y de cada una de sus variables , al menos con el método puntual, que si bien no es muy exacto, es muy útil para las empresas que se inician en el tema, aparte de que otorga toda la rigurosidad y metodología de cálculo, aplicables en los otros modelos de predicción CMD.

Ilustración 39 - Relaciones y leyes que gobiernan un sistema de mantenimiento

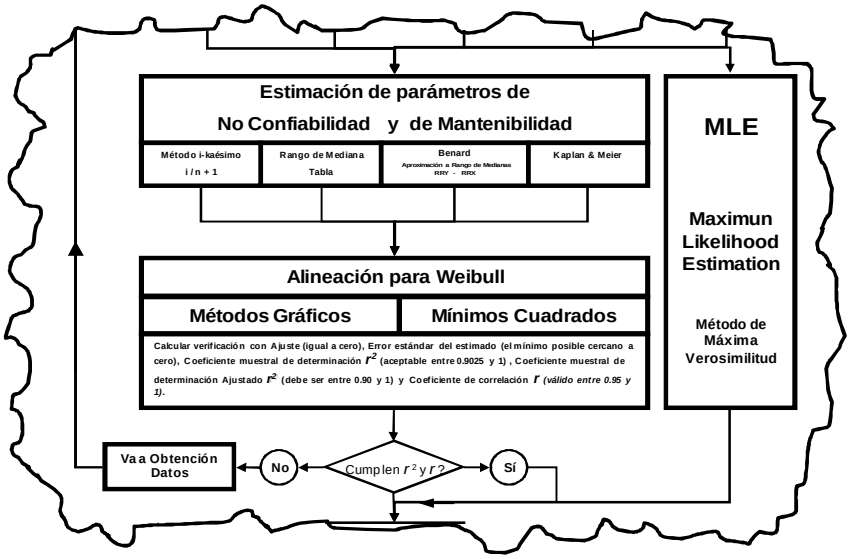


(Mora, 2007b)

El siguiente paso, en la Ilustración 29 es la estimación de parámetros de confiabilidad y mantenibilidad, para luego predecir el comportamiento del CMD y sus variables de cálculo y, en seguida diseñar las estrategias, la táctica y las acciones pertinentes de mantenimiento; que se realizan en el corto, mediano y largo plazo sobre el sistema o equipos que se analizan, tanto en la gestión como en la operación de mantenimiento y producción.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 40 - Pasos de parámetros en predicción CMD



(Mora, 2007a)

2.5 Confiabilidad – Mantenibilidad – CMD – Estimación de F (t_j) y M (t_j)

Los conceptos y desarrollos que se plantean en esta sección corresponden a los pasos que se requieren para la estimación y predicción del CMD, lo que permite tener un control total sobre el sistema de mantenimiento y producción, en cuanto a operación y sostenimiento eficiente de los equipos; al igual que se logra el uso efectivo de los recursos y productos de que se dispone; a la vez que introducen las bases para los cálculos CMD con el modelo de Distribuciones.

2.5.1 Confiabilidad - Fallas

La medida de la confiabilidad de un equipo, es la frecuencia con la cual ocurren las fallas en el tiempo (ESReDa-Industrial, 1998). Si no hay fallas, el equipo es 100% confiable; si la frecuencia de fallas es muy baja, la confiabilidad del equipo es aún aceptable; pero si la frecuencia de fallas es muy alta, el equipo es poco confiable. Un equipo con un muy buen diseño, con excelente montaje, con adecuadas pruebas de trabajo en campo y con un apropiado mantenimiento, no debe fallar nunca (en teoría); sin embargo, la experiencia demuestra que incluso los equipos con mejores: diseños, montajes y mantenimientos; fallan alguna vez (Bazovsky, 2004).

La confiabilidad está estrechamente relacionada con la calidad de un producto y es con frecuencia considerada un componente de esta. La calidad puede se define cualitativamente como la cantidad de satisfacción, de los requerimientos de los usuarios de un producto. La confiabilidad se interesa por cuánto tiempo el producto continúa en funcionamiento, después de entrar en operación. Una baja calidad del producto implica una disminución de su confiabilidad, de la misma manera que una calidad alta implica una confiabilidad elevada.

La probabilidad de que un equipo[136] desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales se diseña, durante un período de tiempo específico y bajo condiciones normales de operación, ambientales y del entorno, se define como confiabilidad (Blanchard, 1995)(Blanchard, y otros, 1994)(Ebeling, 2005)(Nachlas, 1995)(Ramakumar, 1996)(Sotskov, 1972)(Leemis, 1995)(O´Connor, 2002)(Kececioglu, 1995)(Kelly, y otros, 1998)(Dounce, 1998)(Rey, 1996)(Halpern, 1978)(Forcadas, 1983)(Modarres, 1993)(Barlow, 1998)(Barlow, y otros, 1996)(Bazovsky, 2004)(Lewis, 1995)(Nakajima, y otros, 1991).

La definición de confiabilidad muestra que existen cuatro características que definen su estructura: probabilidad,

[136] *Cuando se refiere a un equipo, se abarcan sistemas, unidades, componentes y en general, cualquier elemento que represente una unidad lógica de seguimiento.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

desempeño satisfactorio, período y condiciones específicas:

2.5.1.1 Probabilidad

Las mediciones de CM[137] se hacen en términos de probabilidad, la cual se define en forma clásica, como el resultado de dividir el número de veces de los casos estudiados (intentos o eventos, favorables o no) entre el número total posible de casos (intentos o eventos); en la medida que la cantidad[138] de intentos o casos posibles sea mayor la probabilidad se vuelve más exacta y cercana al valor real. Por ejemplo, la probabilidad de un desempeño eficaz durante 80 horas de 0.75 (o 75%), indica que el equipo funciona satisfactoriamente 75 veces de cada 100 ensayos, durante al menos 80 horas (Blanchard, y otros, 1994).

2.5.1.2 Desempeño satisfactorio

Este indica que se deben establecer criterios específicos para describir lo que se considera, como una operación satisfactoria. Una combinación de factores cualitativos y cuantitativos definen las funciones que el sistema (equipo) debe lograr, usualmente son las especificaciones del sistema(Blanchard, y otros, 1994). Implica además conocer cuándo el equipo falla y ya no se desempeña satisfactoriamente. Para un automóvil, por ejemplo, un adecuado nivel de satisfacción es que se pueda desplazar, si es así, el auto se desempeña satisfactoriamente, aún si su radio se daña o ciertas luces no funcionan (Leemis, 1995).

2.5.1.3 Período

Es la variable aleatoria de la definición de confiabilidad y se refiere a la duración del funcionamiento o longitud de vida; no necesariamente tiene que ser dado en horas, días, meses o años; de acuerdo con el sistema, el tiempo se puede medir con un reloj, el tiempo exacto de operación, el número de ciclos[139] de operación o incluso en otras medidas como kilómetros recorridos, como es el caso de las llantas de un automóvil (Ebeling, 2005)(Ramakumar, 1996). El análisis de dicha variable aleatoria implica el uso de las distribuciones de probabilidad, que deben ser modelos razonables de la dispersión de los tiempos de vida[140] (Nachlas, 1995).

2.5.1.4 Condiciones de operación

Son las circunstancias en las que se espera que el equipo funcione, y constituyen el cuarto elemento relevante de la definición básica de confiabilidad; incluyen factores como ubicación geográfica donde se espera que el equipo opere, el medio ambiente[141], vibraciones, transporte, almacenamiento, empaque, cantidad de la carga[142], etc. (Ramakumar, 1996).

2.5.1.5 Curva de Confiabilidad.

La forma gráfica en que se expresa la confiabilidad, depende de su formulación matemática. La probabilidad de ocurrencia de un evento se define mediante la expresión:

Ecuación 14 - Probabilidades de ocurrencia de un evento (de falla) y confiabilidad

$P_f = \left(\frac{n}{N}\right)$, donde n es (son) el (los) evento (s) de falla (en confiabilidad) a estudiar; N= es el número total de eventos posibles; P_f es la probabilidad de falla.

$P_f = \underset{N \to \infty}{Límite}\left(\frac{n}{N}\right)$, donde P_f se define como la probabilidad de que ocurra el evento n ante una serie grande o infinita N, de eventos posibles.

$R_a = 1 - P_f$, con R_a como la probabilidad de confiabilidad o de éxito o de supervivencia, en un tiempo a, siendo P_f la probabilidad de falla en ese mismo tiempo a.

---

[137] *CM - Confiabilidad Mantenibilidad.*

[138] *Se recomienda valores superiores a treinta y un experimentos (Levin, 1996), en el teorema del límite central, que menciona que cuando la muestra en poblaciones atípicas es igual o superior a treinta (o 31) elementos, la media muestral se asemeja a la media poblacional.*

[139] *Un ciclo puede ser el aterrizaje de un avión o el encendido de un motor eléctrico, o la cantidad de productos o servicios que genera, justo en un período.*

[140] *Tiempos de vida entendidos como la variable aleatoria, sin olvidar que puede estar representada por otras medidas como el kilometraje recorrido etc.*

[141] *Por ejemplo temperatura o ciclos de temperatura, humedad, etc.*

[142] *Entendida en términos generales y no solo de esfuerzos; puede denotar también carga eléctrica, peso soportado por un puente, volumen de digitalización, etc.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(Ramakumar, 1996)

La curva de confiabilidad es la representación gráfica del funcionamiento después de que transcurre un tiempo t en un período T total. Se puede entender de dos maneras: la primera consiste en la representación de la probabilidad de confiabilidad o supervivencia que tiene un elemento, máquina o sistema después de que transcurre un determinado tiempo t; la otra forma de interpretarla es cuando se analizan varios o múltiples elementos (no reparables, normalmente) similares que tienen la misma distribución de vida útil, en este caso expresa el porcentaje de ellos que aún funcionan después de un tiempo t.

Ecuación 15 - Representación matemática de la función de confiabilidad

$R(t) = P[t < T]$, donde *R(t)* es la función de confiabilidad o supervivencia, la cual decrece en la medida que se incrementa el tiempo, al igual *R*(0)=1 o sea que siempre la probabilidad de confiabilidad de cualquier elemento antes de iniciar su funcionamiento es máxima del cien por ciento (100%); t es el tiempo determinado para evaluar el funcionamiento.

$\underset{t \to \infty}{Límite}\ R(t) = 0$, expresa que cualquier elemento o máquina, siempre entra en estado de falla, así sea en un tiempo grande o infinito.

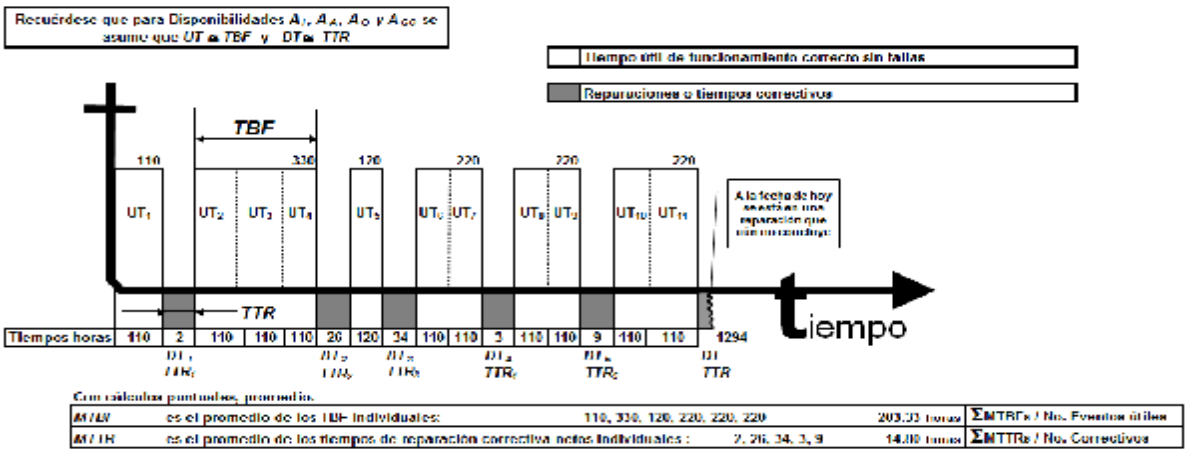
(Leemis, 1995).

2.5.1.6 Ejemplo de cálculo y obtención de curva de confiabilidad

El comportamiento de una máquina en el tiempo, se muestra en el siguiente ejemplo, a partir de los tiempos que tiene en el registro histórico de fallas, reparaciones, mantenimientos planeados, tiempos de demora, entre otros; se presentan los cálculos de rigor para estudiar la curva de confiabilidad y sus parámetros asociados. A efectos del ejemplo se desea calcular la confiabilidad en un caso de Disponibilidad Inherente y para ello se utiliza la distribución de Weibull con rango de mediana con los parámetros de βeta = 2.00, Eta o Alpha = 577.86, t_o [143]= 0; todo con el fin de poder valorar la Curva de Confiabilidad *R(t)* en forma gráfica; en la medida que aumenta el tiempo t, menor es la probabilidad de supervivencia del elemento en estudio.

Ejemplo 6 - Curva de confiabilidad en A_I, Registros Históricos y cálculos de βeta y Eta, Weibull

Se toma el mismo ejemplo que se utiliza en el cálculo de disponibilidades del Ejemplo 2 - Disponibilidad Inherente (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_I, donde:



[143] *To tiempo a partir del cual se empiezan a presentar las fallas de una forma típica, se asume que en el rango entre 0< t < t_o la probabilidad de falla es muy baja o inexistente.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Dato #	Fecha y Hora Inicio de Fallas	Hora Fin de Falla, Inicio de operación normal	TBF	TTR	Día y Hora Inicio UT	Día y Hora Final del UT
			Horas			
1		00 - enero Año inicia a 00:00 horas	110		01 - enero - año inicio a 00:00 horas	04 - enero - año inicio a 14:00 horas
2	04 - enero Año inicio a 14:00 horas	04 - enero Año inicia a 16:00 horas	330	2	04 - enero - año inicio a 16:00 horas	18 - enero - año inicio a 10:00 horas
3	18 - enero año inicio a 10:00 horas	19 - enero Año inicia a 12:00 horas	120	26	19 - enero - año inicio a 12:00 horas	24 - enero - año inicio a 12:00 horas
4	24 - enero año inicio a 12:00 horas	25 - enero Año inicia a 22:00 horas	220	34	25 - enero - año inicio a 22:00 horas	04 - febrero - año inicio a 02:00 horas
5	04 - febrero año inicio a 02:00 horas	04 - febrero Año inicia a 05:00 horas	220	3	04 - febrero - año inicio a 05:00 horas	13 - febrero - año inicio a 09:00 horas
6	13 - febrero año inicio a 09:00 horas	13 - febrero Año inicia a 18:00 horas	220	9	13 - febrero - año inicio a 18:00 horas	22 - febrero - año inicio a 22:00 horas
7	22 - febrero año inicio a 22:00 horas		Ahora			

Estimación de parámetros con aproximación de Rango de Medianas Benard RRY - Weibull					Alineación con regresión - Mínimos Cuadrados		
1	2	3	4	5	6	7	8
No. Dato	Datos de operación sin fallas (en horas)	Consurado No.	Horas de operación sin fallos, organizados en forma ascendente	RM Rango de Mediana Benard denominada F(t)	Uno sobre (1 - R.M.)	Ln(Ln(1/(1-R.M.))) es la Y de la regresion	Ln de datos es la X de la regresion
1	110	1	110	0.1094	1.12280702	-2.15562	4.70048
2	330	1	120	0.2656	1.36170213	-1.17527	4.78749
3	120	1	220	0.4219	1.72972973	-0.60154	5.39363
4	220	1	220	0.5781	2.37037037	-0.14729	5.39363
5	220	1	220	0.7344	3.76470588	0.28192	5.39363
6	220	1	330	0.8906	9.14285714	0.79434	5.79909

6 Elementos totales

Intercepto	**-12.9167**	
β - Beta	**2.3674**	horas
Alpha o Eta	**234.1834**	**η**
r	**0**	**Ro**
***MTBF* Tiempo promedio de funcionamiento sin fallas.**	**207.5499**	**horas**
MTBF = h * Gamma G (1+ 1/b)		

Resulta que en este ejemplo hay 3 UT que son iguales, por lo tanto el tratamiento de alineación es diferente al evento en que no repitieran, se toman los tres iguales y solo se deja uno, el que tenga el *F(t)* más crítico a la luz de las fallas, para el caso particular se toma $F(t_5)$ que vale 0.7344 y los dos similares se eliminan, el caso para alineación se trabaja como si fuese de dos datos menos, o sea de solo 4 eventos y ahí sí se procede a la alineación. En el caso de que se trabaje con *MTTR* , los *DT* o *TTR* repetidos se manejan igual que lo se acaba de explicar para *TBF*

Nuevos cálculos reales y correctos por repetición de UT

Estimación de parámetros con aproximación de Rango de Medianas Benard RRY - Weibull				
1	2	3	4	5
No. Dato	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	Consurado No.	Horas de operación sin fallos, organizados con λ ascendente	RM - Rango de Mediana Benard - F(t)
1	110	1	110	0.1094
2	330	1	120	0.2656
3	120	1	220	
4	220	1	220	
5	220	1	220	0.7344
6	220	1	330	0.8906

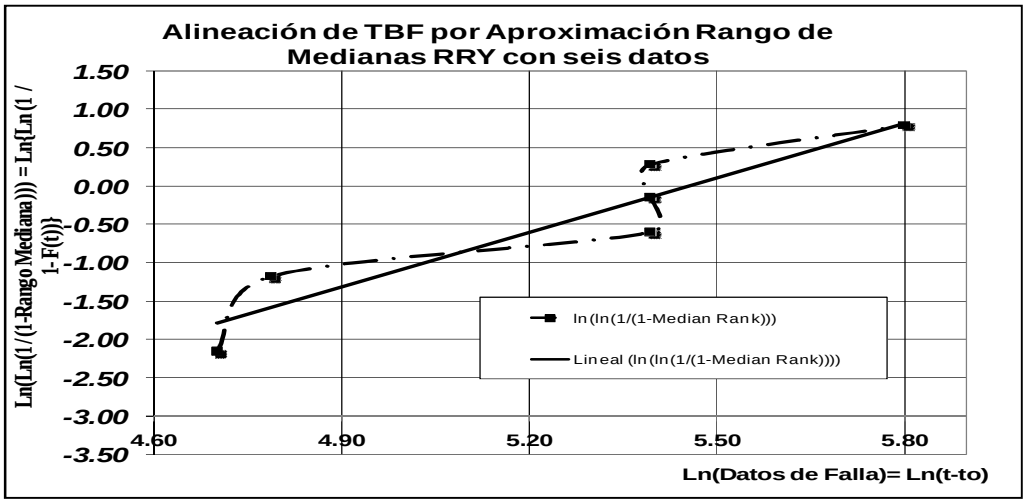
Alineación con regresión - Mínimos Cuadrados		
6	7	8
1 / (1 - Rango Mediana)	Ln(Ln(1/(1-R.M.))) - Y de la regresion	Ln de datos - X de la regresion
1.122807018	-2.15562	4.7004804
1.361702128	-1.17527	4.7874917
3.764705882	0.28192	5.3936275
9.142857143	0.79434	5.7990927

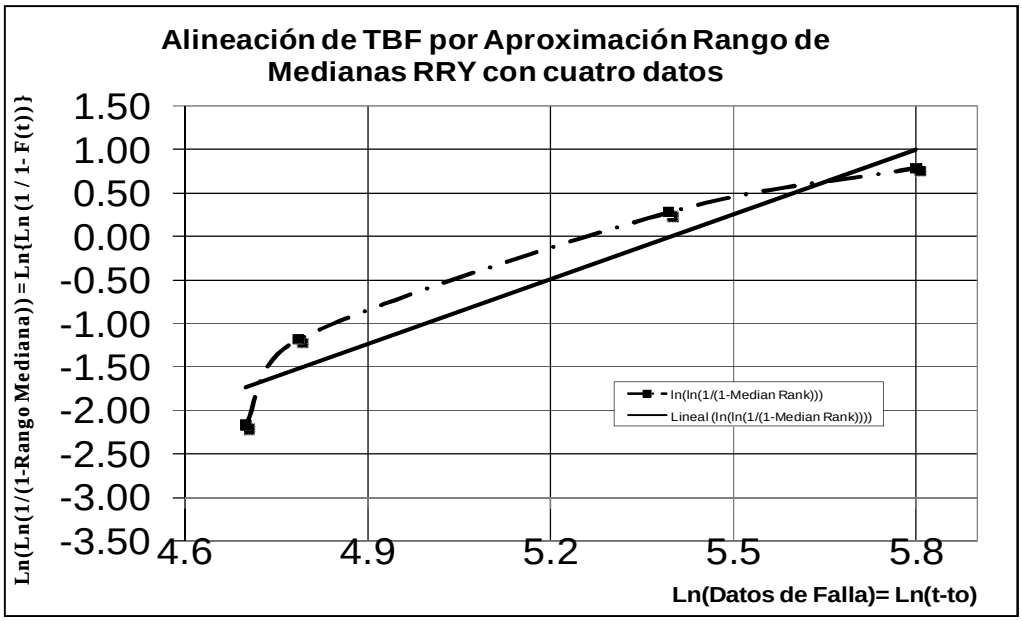
4 Elementos totales

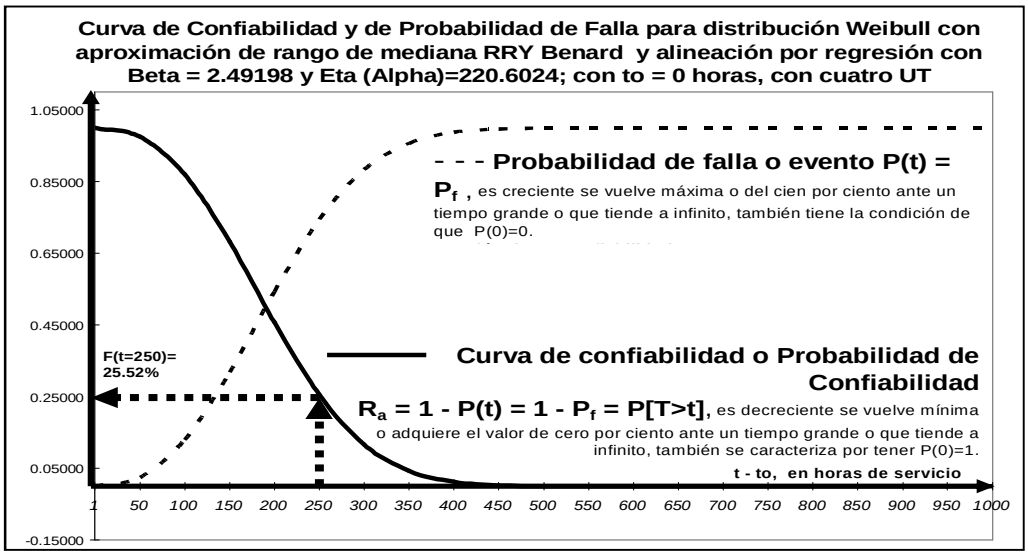
Intercepto	**-13.4476**	
***β* - Beta**	**2.49198**	
Alpha o Eta	**220.6024**	**η**
r	**0**	Ro
***MTBF* Tiempo promedio de funcionamiento sin fallas**	**195.7173**	**horas**
***MTBF* = h * Gamma G (1+ 1/b)**		

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Con *TBF* como tiempo entre fallas y *TTR* como tiempo para reparar.







PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La función de confiabilidad permite responder la pregunta: ¿cuál es la probabilidad de que la máquina dure más de T horas sin fallas en la función *R(t)= P(T>t)?*, si se toma el punto de la ilustración para *R(250) = P[T>250]*, se lee de la gráfica anterior y de la tabla adjunta en el Ejemplo 6 - Ejemplo de la Curva de confiabilidad en A_I, Registros Históricos y cálculos de βeta y Eta en Weibull, que expresa que la probabilidad de que un elemento dure más de 250 horas sin fallar es del 25.52%; si se hace la lectura para múltiples elementos similares o equipos no reparables se expresa que después de 250 horas deben funcionar correctamente más del 25.52 % de ellos; como también se visualiza que existe una probabilidad del 98.78 % de que un elemento entre en falla antes de 400 horas.

Tiempo en Horas - t	Funcion de probabilidad de fallas acumuladas - f.d.p.s. - Suma de fallas hasta el tiempo t P(t) = 1 - R(t) = F(t)	Curva de Confiabilidad R(t)= 1 - F(t)
1	0.00%	100.00%
50	2.44%	97.56%
100	13.00%	87.00%
150	31.78%	68.22%
200	54.31%	45.69%
250	74.48%	25.52%
300	88.37%	11.63%
350	95.75%	4.25%
400	98.78%	1.22%
450	99.73%	0.27%
500	99.95%	0.05%
550	99.99%	0.01%
600	100.00%	0.00%
650	100.00%	0.00%
700	100.00%	0.00%

Es de anotar que en este ejemplo explicativo solo se tienen cuatro *TBF* y cinco *TTR*, pero en la realidad al simular comportamientos de fallas y/o reparaciones deben ser al menos 31 datos de cada uno (teorema del límite central)(Levin, 1996).

La capacidad de un equipo para funcionar correctamente sin interrupciones[144] se puede conocer mediante la utilización de los indicadores de confiabilidad, los cuales deben ser fáciles de manejar y entendibles, su procedimiento de cálculo debe estar al alcance de los usuarios normales, los indicadores deben ser la menor cantidad posible (González, 2004); para ello en la sección de disponibilidad se hace un tratamiento suficiente de los mismos y se entrega adjunto a este libro el programa informático capaz de realizar el cálculo del CMD con una fácil interpretación que proporciona su entendimiento y aplicación.

Los tiempos de operación sin fallas, como los períodos invertidos en reparaciones, se pueden analizar de varias formas, una de ellas es mediante el uso de distribuciones ya estandarizadas que emulen su comportamiento en el tiempo, también por métodos puntuales, otra manera es tratar de encontrar funciones matemáticas que reflejen el comportamiento en el tiempo de las fallas, de las operaciones sin falla o de las reparaciones de los elementos a través del análisis de sus materiales, componentes, comportamiento físico y funcional, variables de condición de estado (desgaste, temperaturas, viscosidad, entre otros.), efectos, etc., con el fin de poder estimar su actuación en el tiempo.

2.5.2 Mantenibilidad – Reparaciones

A la probabilidad de que un elemento, máquina o dispositivo, pueda regresar nuevamente a su estado de funcionamiento normal[145] después de una avería, falla o interrupción productiva (funcional o de servicio), mediante una reparación que implica la realización de unas tareas de mantenimiento, para eliminar las causas inmediatas que generan la interrupción; se le denomina mantenibilidad. La normalidad del sistema al restaurarse su funcionalidad, se refiere a su cuerpo como a su función.

Se asume que para restaurar el nivel de confianza de funcionalidad al equipo, la reparación se hace con: personal adecuado con las habilidades necesarias y las herramientas adecuadas, con los datos e información técnica pertinente, con las características específicas de la función del equipo, con el conocimiento de los factores ambientales y de entorno que requiere el equipo para funcionar normalmente, con unos períodos de tiempo normales ya conocidos para realizar las tareas específicas de mantenimiento (Knezevic, 1996)(Kececioglu, 1995)(Rey, 1996)(Blanchard, y otros, 1994)(Kelly, y otros, 1998)(Blanchard, 1995).

---

[144] *Debidas a fallas imprevistas, a falta de insumos, a falta de energía o información o por cualquier otra razón.*

[145] *Su estado de referencia normal, no necesariamente tiene que ser igual al diseño original, se refiere a la normalidad como las condiciones usuales en que el equipo genera servicios o productos, sin ningún problema.*

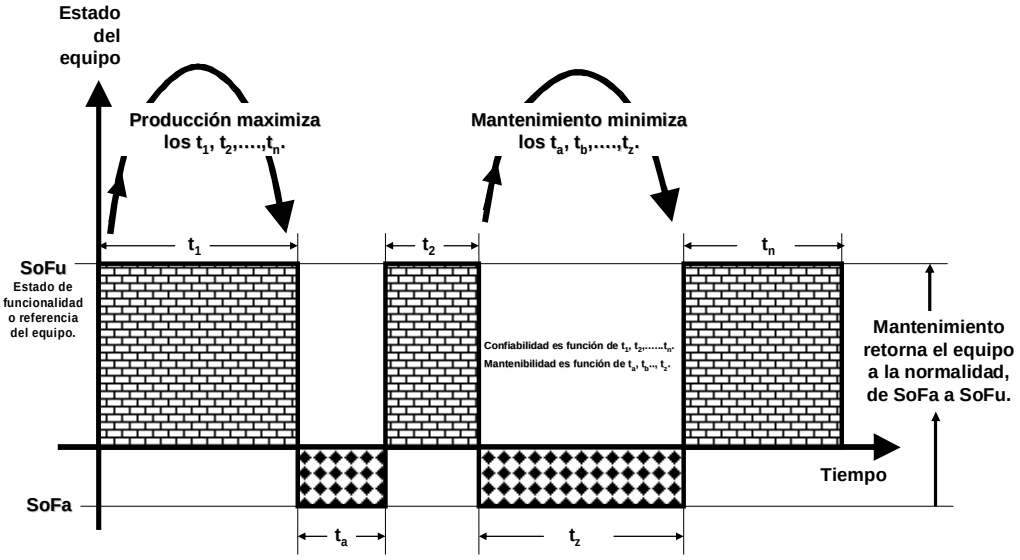
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La mantenibilidad se asocia a la facilidad con que un elemento o dispositivo se puede restaurar[146] a sus condiciones de funcionalidad establecidas, lo cual implica tener en cuenta todas las características y hechos previos que ocurren antes de alcanzar ese estado de normalidad, tales como: el diseño, el montaje, la operación, las habilidades de los operarios, las modificaciones realizadas, las reparaciones anteriores, la capacidad de operación, la confiabilidad, los mantenimientos realizados a lo largo y ancho de la vida útil del equipo, el entorno, la legislación pertinente, la calidad de los repuestos, la limpieza, el impacto ambiental que genera, etc., que influyen directamente en el grado de mantenibilidad de un equipo.

En general la forma más clara de medir la mantenibilidad es en términos de los tiempos empleados en las diferentes restauraciones, reparaciones o realización de las tareas de mantenimiento requeridas para llevar nuevamente el elemento o equipo a su estado de funcionalidad y normalidad. La mantenibilidad expresa la capacidad con que un equipo se deja mantener para regresarlo a su estado de referencia. El mantenimiento, son las acciones concretas que se realizan para mejorar la mantenibilidad, siendo esta última la calificación de cómo se realiza el mantenimiento.

En síntesis hasta el momento se puede afirmar que la confiabilidad permite establecer y medir cómo actúa el área de producción en la administración y explotación de los equipos para generar bienes y servicios y, por otro lado la mantenibilidad evalúa la gestión y operación del mantenimiento (Mora, 2007c) (Mora, 1999) que se realiza a esos elementos o máquinas. La disponibilidad es el adjetivo calificativo integral de las dos áreas (producción y mantenimiento, actuando conjuntamente), como de otras divisiones de la empresa; mide la obtención de productos y bienes intangibles de la empresa en general. La confiabilidad es responsabilidad de producción, la mantenibilidad es compromiso de mantenimiento y la disponibilidad es encargo de la gerencia o dirección que está por encima de ambas y que abarca probablemente otras áreas de la compañía.

Ilustración 41 - Descripción de CMD en el tiempo, funciones y responsabilidades



(Mora, 2007a)

Es más usual que los diseñadores, fabricantes, usuarios e instaladores de máquinas se preocupen más de la funcionalidad del equipo que de su mantenibilidad, en la actualidad se le da mucha importancia por parte de

[146] *Se parte de la base de que solo es posible aplicarles mantenimiento (o que se les pueden realizar acciones correctivas, modificativas, preventivas o predictivas de mantenimiento) a aquellos equipos susceptibles de ser reparados. A los elementos o aparatos desechables que no tienen reparación o que sale más costoso realizarla, no se les puede medir la mantenibilidad.*
La característica para determinar si un sistema es o no reparable depende de los aspectos técnicos (como por ejemplo el caso de bombillos, fusibles, etc. que no se les puede aplicar mantenimiento por su condición propia de diseño original) y de las circunstancias; un ejemplo claro es un cohete, el cual normalmente solo se repara cuando está en tierra (Gnedenko, y otros, 1999).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

industriales, empresarios de servicios, diseñadores, constructores, ingenieros, técnicos, tecnólogos, expertos, etc., a las medidas de CMD ya que son indicadores científicos y prácticos, que permiten controlar todas las actividades inherentes a mantenimiento, producción e ingeniería de fábricas; la industria militar utiliza con mucho énfasis estas metodologías para el control de sus equipos.

La ingeniería de mantenibilidad se crea cuando los diseñadores y fabricantes comprenden la carencia de medidas técnicas y disciplinas científicas en el mantenimiento. Por esto es una disciplina científica que estudia la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades que debe realizar el usuario para mantener la mantenibilidad de un producto y que elabora métodos para su cuantificación, evaluación y mejora (Mora, 2007b).

La forma en que se pueden reducir los costos de mantenimiento, se enfoca en dos ambientes: en la confiabilidad mediante el control de sus indicadores(González, 2004), en especial el indicador βeta para garantizar el nivel de funcionalidad y fiabilidad del equipo, al ampliar los tiempos entre mantenimientos planeados y por otro lado en la mantenibilidad contribuye a disminuir los tiempos de reparaciones y servir de base para el análisis de fallas *FMECA*[147] en la erradicación de las fuentes de paradas imprevistas y fallas.

La magnitud del tiempo necesario que se emplea para la recuperación de la función, sólo se puede intervenir en una etapa muy al inicio del proceso de diseño, por medio de decisiones relacionadas con la complejidad de la tarea de mantenimiento, accesibilidad de los elementos, seguridad de recuperación, facilidad de prueba y localización física del elemento, así como con las decisiones relacionadas con los recursos de apoyo del mantenimiento, tales como instalaciones, repuestos, herramientas, personal calificado, entre otros (Knezevic, 1996).

2.5.2.1 Curva de la bañera o de Davies

Las diferentes acciones que se deciden sobre las tareas a realizar por parte de mantenimiento (y producción), dependen entre otros parámetros de la curva de la bañera o de Davies (Ebeling, 2005) donde se muestra la evolución en el tiempo frente a la Tasa de Fallas $\lambda(t)$ y el valor del parámetro de forma βeta del equipo que se evalúa, acorde a su valor para ese momento del equipo, se selecciona si las tareas de mantenimiento deben ser correctivas, modificativas, preventivas o predictivas, al tener en cuenta la fase en que se encuentre el elemento o sistema. A partir de la curva de Davies se define el nivel II operacional de mantenimiento (véase Ilustración 27 - Niveles y categorías del mantenimiento bajo enfoque sistémico).

El comportamiento de la Tasa de Fallas en la Fase I[148] es decreciente, en la medida que pasa el tiempo la probabilidad de que ocurra una falla disminuye, las operaciones que se sugieren en esta fase son las de tipo correctivo y modificativo, en especial las primeras dado que las fallas que aparecen habitualmente son diferentes, la eliminación de fallas sucesivas recurrentes normalmente se logra mediante la aplicación de la metodología análisis de fallas *FMECA*, ya sea por las correctivas o modificativas.

En la Fase I sirven mucho las acciones correctivas dentro de un proceso *FMECA* y las modificativas aparte de que son útiles en la I, sirven en la fase dos siguiente, donde las causas de fallas son utilizaciones por debajo o por encima de lo nominal. Las acciones modificativas permiten corregir cualquier defecto de diseño o montaje, calidad de materiales, métodos inadecuados de mantenimiento o cualquier otra falla característica de esta Fase I o de la II. La acción sistémica de eliminación de causas de fallas se denomina *debugging*[149]

La fase II se tipifica por fallas enmarcadas en origen técnico, ya sea de procedimientos humanos o de equipos, las acciones que más se adaptan a esta etapa son de las de tipo modificativo, ya que al generarse por utilizaciones

---

[147] *FMECA Failure Mode, Effects Causes and Criticality Analysis – Análisis de los Modos, los Efectos, las Causas y las Criticidades de las Fallas.*

[148] *En esta Fase I de rodaje o de mortalidad infantil, normalmente existe un proceso conocido como asentamiento o de acondicionamiento inicial. En esta etapa se aconseja que el equipo se vaya llevando "en forma gradual" a sus máximas condiciones de carga, velocidad y temperatura. Es una etapa en la cual se presenta un pulimentado de las superficies, de manera que se disminuyen las alturas de las irregularidades producto del maquinado o acabado final de la pieza. De la forma en que se haga este proceso de asentamiento dependerá la vida futura del equipo o elemento. Mantenimiento debe asegurarse de que este proceso se cumpla adecuadamente. Ahora bien, la mortalidad de que se habla en esta etapa tiene en cuenta que el proceso de asentamiento ya se haya realizado y este período esta incluido en esta etapa. Independientemente de las diferentes causas de falla en esta etapa de mortalidad infantil, ella tiene influencia en el funcionamiento durante las etapas II y III (Benítez, 2007).*

[149] *La anécdota de ésta palabra, que significa literalmente "eliminación de insectos" y la cual es usada también en informática, se origina en una falla que ocurre en un ordenador (o computador) primitivo y genera que un insecto se electrocute, esto ocurre en el pasado (Díaz, 1992).*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

fuera del estándar (de equipos o de personas), se requiere modificar esos equipos y/o procesos, dentro de nuevos estándares, mediante técnicas modificativas, cuando las fallas son esporádicas o recurrentes; en el evento de ser fallas crónicas se actúa con *FMECA* y acciones modificativas. λ

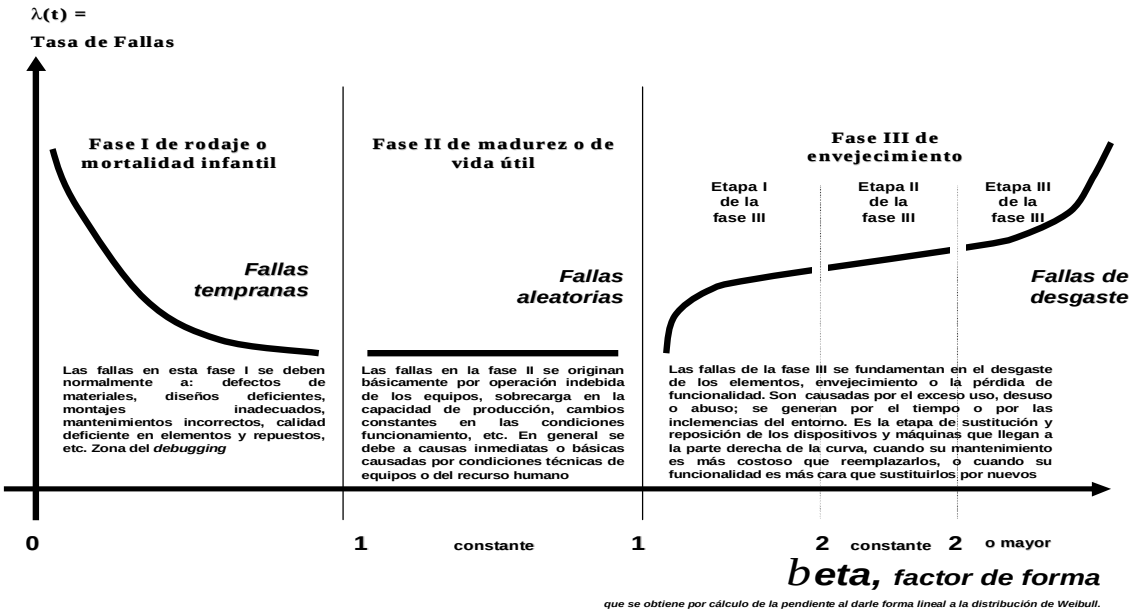
La probabilidad de falla en esta Fase II es constante, indiferente del tiempo que transcurra, por ejemplo si se tienen dos elementos similares y uno de ellos se le acaba de hacer un mantenimiento o reparación, mientras al otro desde hace algunos años no se le realizan tareas de mantenimiento, en el instante actual ambos tienen la misma probabilidad de tener una falla.

Durante la Fase III se observa un incremento paulatino de la tasa de fallas en la medida que aumenta el tiempo hacia la derecha, en esta sección se presentan varias etapas: en el ciclo I de la Fase III, la tasa de fallas empieza a aumentar en forma suave, es decir su incremento es bajo y crece hacia la derecha en forma leve, las fallas que aparecen son conocidas y se empieza a tener experiencia y conocimiento sobre ellas, son debidas a los efectos del tiempo por causas de uso, abuso o desuso; en esta fase ya se pueden empezar a utilizar acciones planeadas de tipo preventivo ya que las fallas se conocen y se tiene algún control sobre ellas, es la etapa donde la ingeniería de confiabilidad principia a tener dominio sobre el sistema, es la zona de ingeniería por excelencia.

En la etapa II de la Fase III se incrementa la tasa de fallas en forma constante con pendiente positiva en forma rectilínea, en esta sección se inicia la transición de acciones preventivas hacia acciones predictivas, el comportamiento de las fallas empieza a ser predecible, es la franja donde se logra implementar de una forma sólida las acciones preventivas.

Por último aparece la zona III de la Fase III de envejecimiento puro, donde la vida útil del elemento se acelera y la tasa de fallas se incrementa aceleradamente, en esta etapa normalmente se estabiliza el uso de acciones predictivas y cuando estas ya no mejoran la mantenibilidad de la máquina se usa la reposición o sustitución como única alternativa, en esta etapa III de la Fase III aún se continúa con el uso de técnicas preventivas y eventualmente correctivas y modificativas, la mayoría de las fallas son causadas por acción del tiempo y como tal, se usan las acciones predictivas para tipificar el comportamiento futuro de los elementos con el fin de conocer su verdadera vida útil en tiempo presente.

Ilustración 42 - Curva de la bañera o de Davies



(Mora, 2007b)

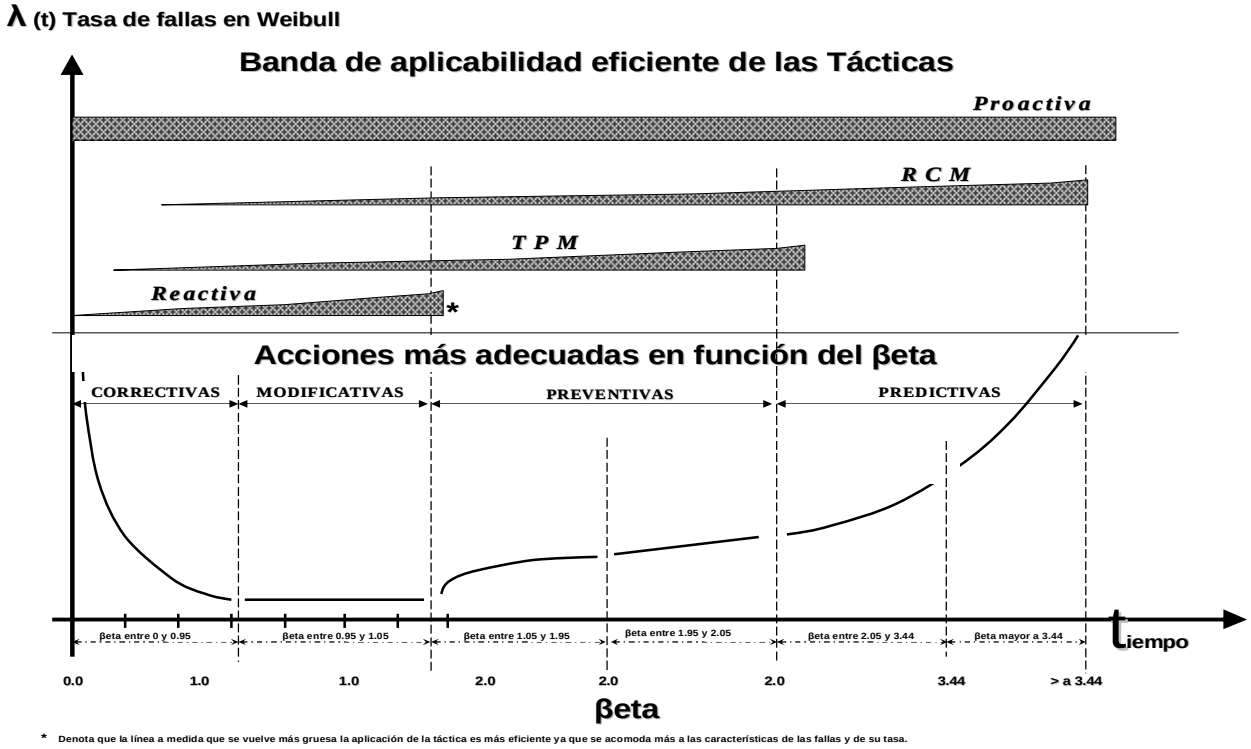
El indicador de confiabilidad βeta es una medida de dispersión del comportamiento de las fallas y es inverso a la duración promedio de estas; en la fase I de la curva de Davies aparecen fallas minúsculas e intensas en tiempo, las fallas son impredecibles y de comportamiento atípico, en la fase II ya se empieza a tener cierto control sobre las fallas imprevistas y estas empiezan a estabilizarse en tiempo de duración, normalmente desaparecen en esta fase II las fallas intempestivas y desconocidas, en la etapa I de la fase III ya las fallas se vuelven muy similares en

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

tiempo y se conocen con antelación, en la zona II de la fase III la duración de las fallas tiende a estabilizarse y en la sección III de la fase III es donde ocurren fallas totalmente predecibles y sus tiempos de duración se normalizan totalmente.

Ilustración 43 - Curva de Davies, acciones y tácticas adecuadas, acorde al valor del βeta

(Mora, 2007a)



2.5.2.2 Curva de Mantenibilidad

El tratamiento de la curva de Mantenibilidad es similar al de la curva de confiabilidad; esta función se representa por M(t) e indica la probabilidad de que la función del sistema se recupere y el equipo se repare dentro de un tiempo definido t antes de un tiempo especificado total T.

Ecuación 16 - Representación matemática de la función de mantenibilidad

$M(t) = P[T \leq t]$, donde *M(t)* es la función de mantenibilidad o de reparación, la cual es creciente, va aumentando en la medida que se incrementa el tiempo t. Al igual $\underset{t \to o}{Límite}\ M(t) = 0$ o enunciado como *M* (0) = 0 denota que siempre, la probabilidad de realizar un mantenimiento en un tiempo cero es cero, en la medida que se amplía el tiempo de realización, la curva de mantenibilidad aumenta para volverse máxima en un tiempo mayor o infinito; esto revela que en la medida que se asigne un tiempo más grande y máximo *T* para realizar un mantenimiento, la probabilidad exitosa de realizarlo en un tiempo *t* crece. *T* es el tiempo máximo o límite superior total, *t* es el tiempo determinado para realizar la acción de mantenimiento; la expresión $T \leq t$ denota que siempre el tiempo total T es menor o igual que el tiempo de evaluación *t* de estudio de la reparación, o dicho de otra manera, la finalización de la reparación se logra siempre en un tiempo *T* menor a *t*, *t* siempre es mayor o igual a 0 y el $\underset{t \to \infty}{Límite}\ M(t) = 1$, o expresado como *M(t)* = 1 que denota que cualquier elemento tiene una probabilidad tendiente al 100% de ser bien reparado, así sea en un tiempo infinito.

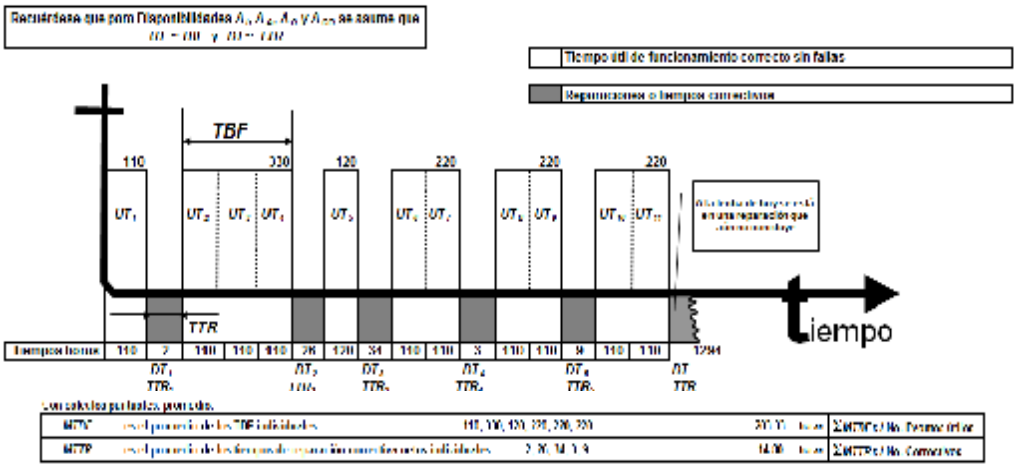
(Leemis, 1995)

Ejemplo 7 - Ejemplo de Curva de Mantenibilidad en A_I - Registros Históricos y cálculos con βeta y Eta, Weibull

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Se toma como base de cálculo del mismo ejemplo de disponibilidad inherente anterior, con los procesos de estimación de parámetros mediante Weibull.

Dato #	Fecha y Hora Inicio de Fallas	Hora Fin de Falla, Inicio de operación normal	TBF	TTR	Día y Hora Inicio UT	Día y Hora Final del UT
			Horas			
1		00 - enero Año inicia a 00:00 horas	110		01 - enero - año inicio a 00:00 horas	04 - enero - año inicio a 14:00 horas
2	04 - enero Año inicio a 14:00 horas	04 - enero Año inicia a 16:00 horas	330	2	04 - enero - año inicio a 16:00 horas	18 - enero - año inicio a 10:00 horas
3	18 - enero año inicio a 10:00 horas	19 - enero Año inicia a 12:00 horas	120	26	19 - enero - año inicio a 12:00 horas	24 - enero - año inicio a 12:00 horas
4	24 - enero año inicio a 12:00 horas	25 - enero Año inicia a 22:00 horas	220	34	25 - enero - año inicio a 22:00 horas	04 - febrero - año inicio a 02:00 horas
5	04 - febrero año inicio a 02:00 horas	04 - febrero Año inicia a 05:00 horas	220	3	04 - febrero - año inicio a 05:00 horas	13 - febrero - año inicio a 09:00 horas
6	13 - febrero año inicio a 09:00 horas	13 - febrero Año inicia a 18:00 horas	220	9	13 - febrero - año inicio a 18:00 horas	22 - febrero - año inicio a 22:00 horas
7	22 - febrero año inicio a 22:00 horas		Ahora			



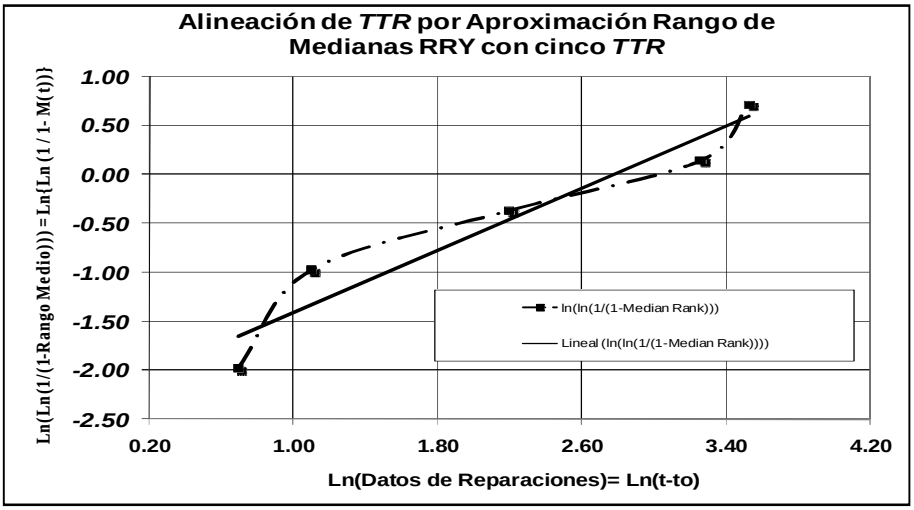
$$Disponibilidad\ \ Inherente\ = A_A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{203.33}{203.23 + 14.80} = 93.21\%$$

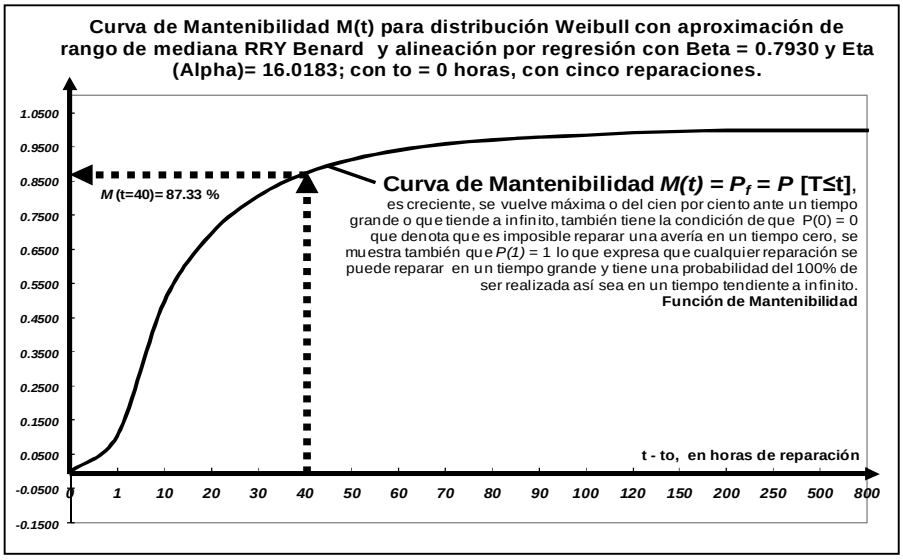
Estimación de parámetros con aproximación de Rango de Medianas Benard RRY - Weibull					Alineación con regresión - Mínimos Cuadrados		
1	2	3	4	5	6	7	8
No. Dato	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	Censurado o No.	Horas de operación sin fallos, organizados con λ ascendente	RM - Rango de Mediana Benard - *M(t)*	Uno sobre (uno menos R.M.) -	Ln(Ln(1/(1-R.M.))) - Y de la regresion	Ln de datos - X de la regresion
1	2	1	2	0.1296	1.148936	-1.9745	0.6931
2	26	1	3	0.3148	1.459459	-0.9727	1.0986
3	34	1	9	0.5000	2.000000	-0.3665	2.1972
4	3	1	26	0.6852	3.176471	0.1448	3.2581
5	9	1	34	0.8704	7.714286	0.7145	3.5264
			5	Elementos totales			

Intercepto	**-2.1995**	
β - Beta	**0.7930**	
Alpha o Eta	**16.0183**	**η**
r	**0**	***Ro***
***MTTR* Tiempo promedio de reparaciones**	**18.2649**	**horas**
MTTR = h * Gamma G (1+ 1 / b)		

En los resultados se puede observar que hay una variación significativa entre el *MTTR* puntual de 14.80 horas y el estimado por Rango de Mediana y alineación por regresión de 18.2649 horas.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com





Se lee de la gráfica y de la tabla que existe una probabilidad del 87.33 % de que una reparación que se haga en el equipo no dure más de 40 horas, también se puede leer que el 87.33% de las reparaciones deben realizarse en tiempos inferiores a 40 horas y por último para múltiples equipos similares se puede describir que el 87.33 % de las veces que se reparan estas máquinas no duran más de 40 horas las reparaciones.

t	Mantenibilidad M (t)
0	0.00%
1	10.49%
5	32.78%
10	49.75%
15	61.30%
20	69.65%
30	80.69%
40	87.33%
50	91.51%
60	94.21%
70	96.01%
80	97.21%
90	98.04%
100	98.61%
110	99.00%
120	99.28%
130	99.48%
140	99.62%
150	99.72%
160	99.80%
170	99.85%
180	99.89%
190	99.92%
200	99.94%
210	99.95%
220	99.97%
230	99.97%
240	99.98%
250	99.99%
290	100.00%
300	100.00%
400	100.00%
500	100.00%
600	100.00%

La mantenibilidad se afecta por los tiempos de mantenimiento o reparaciones, los cuales la influencian, a través de los siguientes conceptos:

- En la disponibilidad genérica: *TTR*, *PM*, *ADT*, *LDT´*, *LDT* y demás factores.
- En la disponibilidad inherente solo el *TTR*.
- En la disponibilidad alcanzada el *TTR* y el *PM*.
- En la disponibilidad operacional por *TTR*, *PM*, *ADT*, *LDT´* y *LDT*. A pesar de que son similares a la genérica no dan igual que ella pues el cálculo se realiza en forma diferente.
- En la disponibilidad operacional por *TTR*, *PM*, *ADT*, *LDT´* y *LDT* (el *Ready Time* no afecta la mantenibilidad).

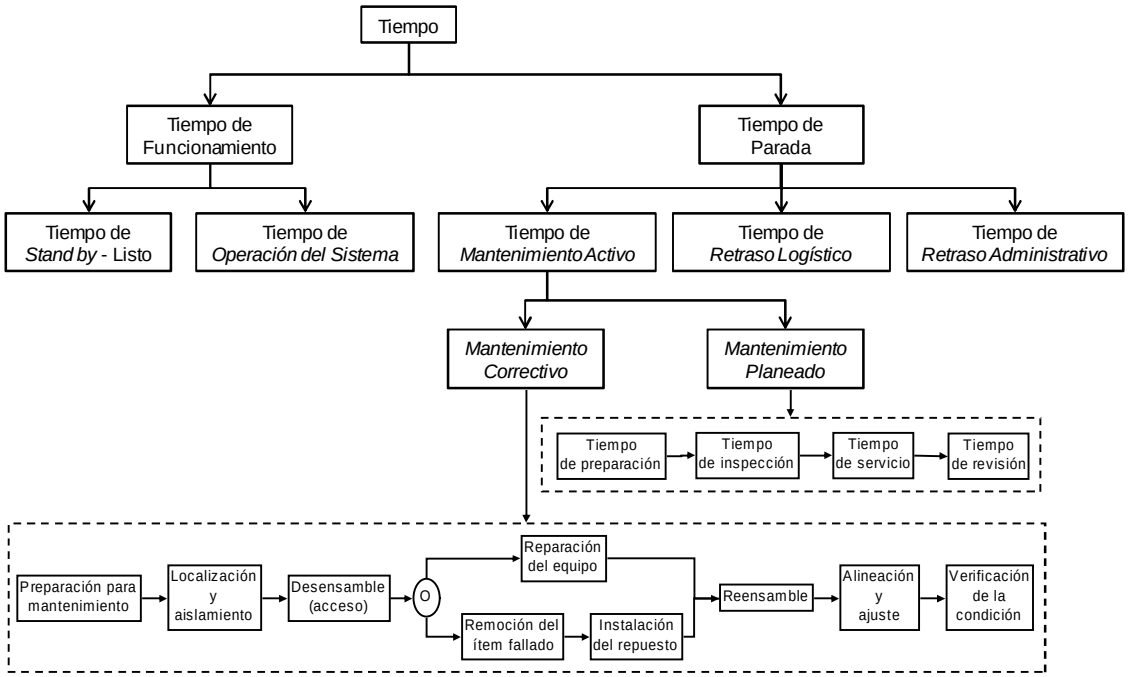
Los cálculos de la mantenibilidad se realizan en forma diferente y dependen de la disponibilidad que se use, los elementos que se deben estimar son en cada caso:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Para disponibilidad genérica *MDT*.
- Para disponibilidad inherente *MTTR*.
- Para disponibilidad alcanzada $\overline{M}$ el cual se obtiene del correctivo con *MTTR* y de lo planeado con M_P.

Para disponibilidad operacional y operacional generalizada $\overline{M}$ y $\overline{M}'$ respectivamente, el cual se obtiene del correctivo con *MTTR* y de lo planeado con M_P, pero sus valores son diferentes a los de la A_A debido a que se tienen en cuenta los tiempos logísticos de *Down Time* tanto en el caso de reparaciones como de mantenimientos planeados.

Ilustración 44 - Ciclo general de actividades de reparaciones correctivas y/o mantenimientos planeados.



(Mora, 2007a)

2.5.3 Estimación de No Confiabilidad[150] - F(t) y de Mantenibilidad - M(t)

La estimación de los respectivos parámetros tanto en no confiabilidad como en mantenibilidad, se realiza inicialmente acorde a la Ilustración 29 - Modelo universal e integral, propuesto para la medición CMD a partir de la función de Weibull, ya que ella tiene la ventaja de simular el comportamiento de la función de no confiabilidad o de mantenibilidad, indiferente de la fase en que se encuentre la tasa de fallas (decreciente, casi constante y creciente, véase Ilustración 42 - Curva de la bañera o de Davies) o de reparaciones del equipo en estudio, en el suceso de que la función Weibull cumpla y se ajuste adecuadamente (lo cual se verifica con la prueba de tres bondades de ajuste en el modelo propuesto (Kolgomórov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi cuadrado(Ji^2))[151]), solo se utiliza una función.

En el evento de que la función Weibull no se ajuste bien, se utiliza y se selecciona una segunda opción de función[152], la cual depende del valor de βeta que se halla en la primera función (para el caso particular del Modelo propuesto se sugiere que si el valor de βeta está entre 0 y 1.95 se utilice Gamma o Log-Normal, si está entre 1.95 y 2.05 solo Weibull, si se encuentra por encima de 2.05 se usa Normal); ya en el caso donde no cumpla con ninguna de las opciones anteriores se recomienda revisar los datos actuales o esperar un tiempo prudencial hasta

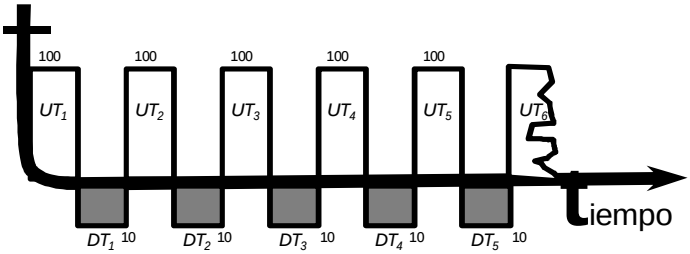
[150] *Se usa la palabra no confiabilidad como la negación de la misma, esto se consulta con la Real Academia Española con su Departamento de español el día 30 de mayo de 2005; donde dice que se debe preferir no confiabilidad a desconfiabilidad.*
[151] *En el modelo propuesto se aceptan como buenas, al cumplir dos de las bondades de ajuste, cualquiera que sean.*
[152] *A la cual se le realizan también las tres pruebas de bondad de ajuste con los tres métodos descritos anteriormente, lo cual asegura la calidad del ajuste encontrado.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

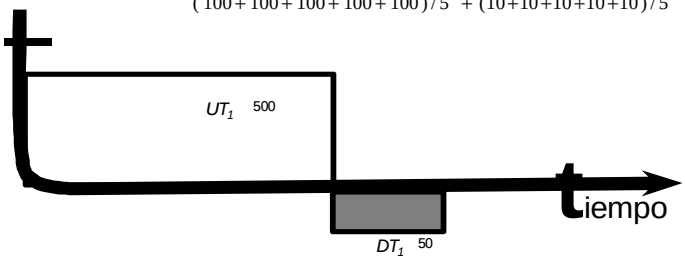
que se tengan más eventos de fallas, reparaciones, mantenimientos, *LDT*, etc., de tal forma que sí se ajuste a alguna de las funciones descritas.

El cálculo mediante los modelos de confiabilidad y mantenibilidad al utilizar distribuciones, presenta una gran ventaja frente al modelo puntual, que se desarrollan como ejemplos en párrafos anteriores, en este mismo capítulo en cada una de las disponibilidades presentadas. Cuando el cálculo del MTBF o del MTTR se realiza con el método puntual de promedios, se tiene la desventaja de que varias curvas de confiabilidad o de mantenibilidad pueden entregar los mismos valores de MTTF o MTTR, lo que le resta credibilidad al método puntual, es decir se puede obtener el mismo tiempo promedio entre fallas o de reparaciones para casos totalmente diferentes o antagónicos.

Ilustración 45 - Dos casos con igual disponibilidad (método puntual) y comportamientos antagónicos



$$Disponibilidad\ caso\ superior = \frac{(100+100+100+100+100)/5}{(100+100+100+100+100)/5 + (10+10+10+10+10)/5} = 90.90\%$$



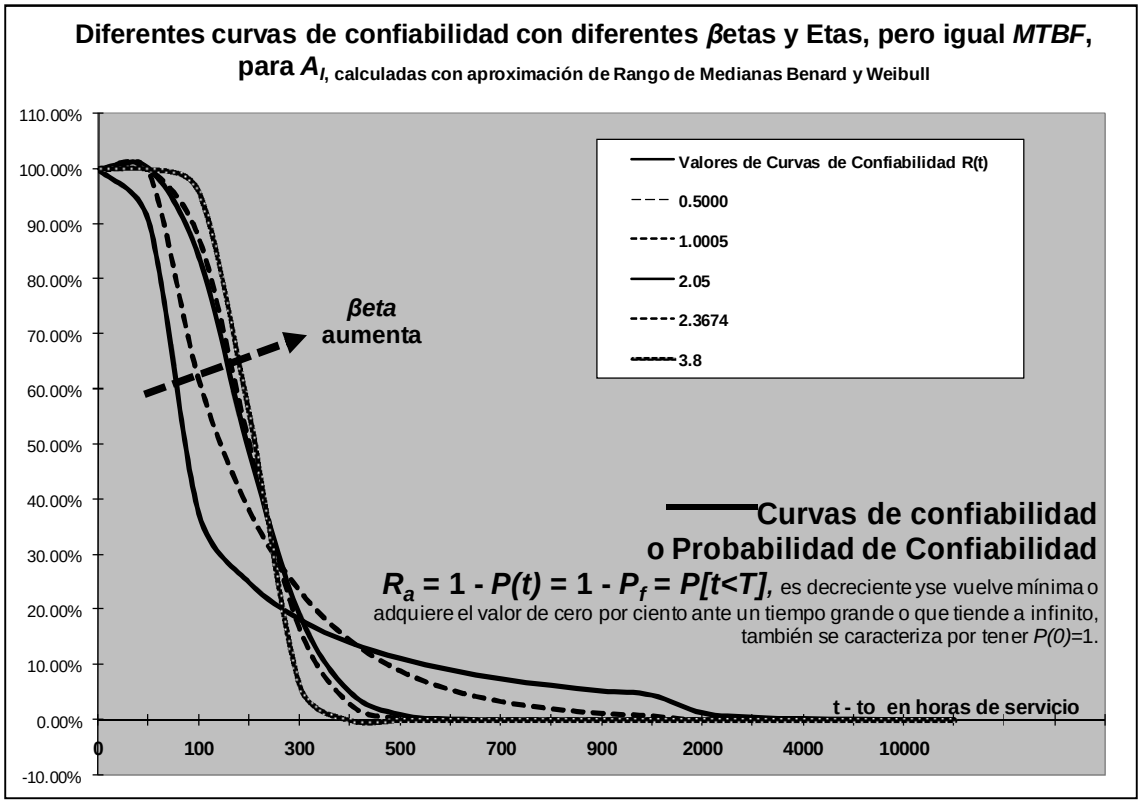
$$Disponibilidad\ caso\ inferior = \frac{(500)/1}{(500)/1 + (50)/1} = 90.90\%$$

Se observa en la ilustración anterior, que las dos disponibilidades son iguales, pero indudablemente desde la óptica de ingeniería de fábricas es mejor el caso inferior. De aquí se concluye que el método puntual es incompleto y le falta algo que ayude a diferenciar o complementar casos como el anterior; esto se logra con los parámetros como *β*eta en el método de distribuciones.

Ejemplo 8 - Varias curvas de confiabilidad diferentes para el mismo MTBF

βeta (Parámetro de Forma, influenciado por la tendencia) =	b	0.5000	1.0005	2.05	2.3674	3.8
Eta o Alpha (parametro de escala o vida característica) =	η	103.775	207.595	234.28	234.1833827	229.65
MTBF = h * Gamma G (1+ 1/b) =	MTBF	207.55	207.55	207.55	207.55	207.55
	t-to Datos de falla en horas, con $t_o = 0$	Valores de Curvas de Confiabilidad *R(t)*				
	0	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	1	90.65%	99.52%	100.00%	100.00%	100.00%
	100	37.47%	61.78%	83.98%	87.51%	95.84%
	200	24.95%	38.16%	48.53%	50.24%	55.36%
	300	18.26%	23.57%	19.01%	16.57%	6.33%
	400	14.04%	14.55%	5.01%	2.87%	0.03%
	500	11.14%	8.99%	0.88%	0.24%	0.00%
	600	9.03%	5.55%	0.10%	0.01%	0.00%
	700	7.45%	3.43%	0.01%	0.00%	0.00%
	800	6.23%	2.11%	0.00%	0.00%	0.00%
	900	5.26%	1.31%	0.00%	0.00%	0.00%
	1000	4.49%	0.81%	0.00%	0.00%	0.00%
	2000	1.24%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%
	3000	0.46%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	4000	0.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	5000	0.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	10000	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	20000	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

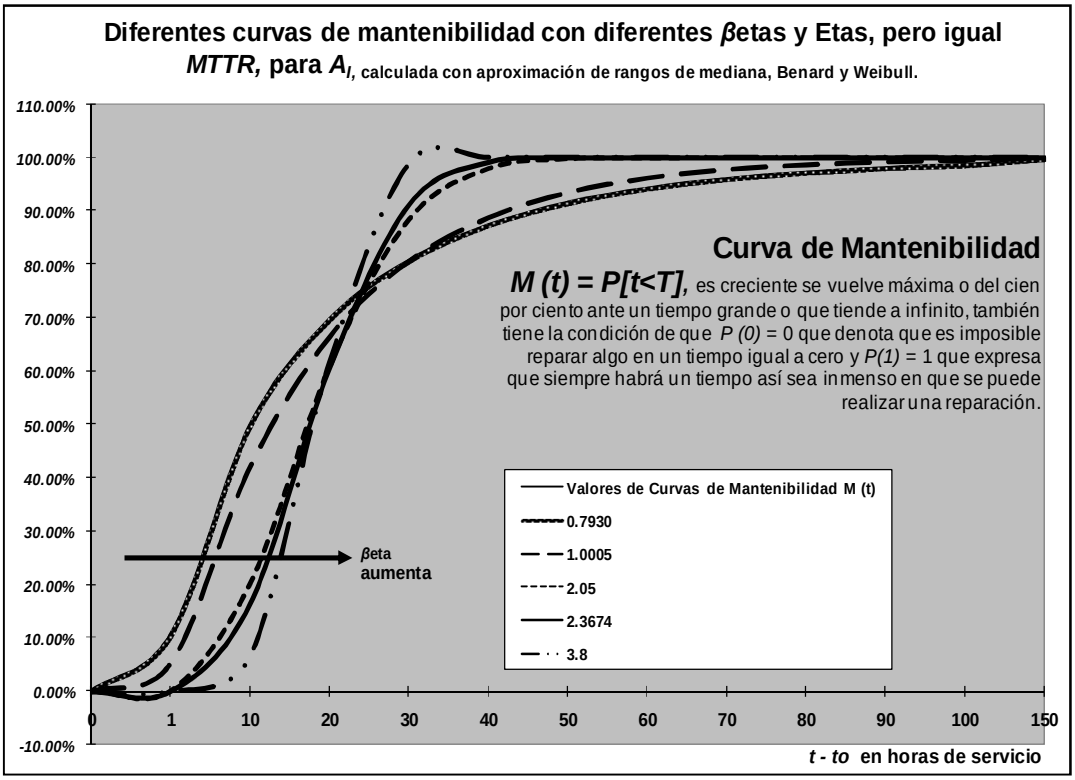


Ahora se hace lo mismo con *MTTR*, mediante la variación de los *β*etas y los Etas para obtener un resultado similar al anterior, donde aparecen varias curvas de mantenibilidad diferentes, con diversas formas, en función de los diferentes valores del *β*eta.

Ejemplo 9 - Varias curvas de mantenibilidad diferentes, para el mismo MTTR

βeta (Parámetro de Forma, influenciado por la tendencia) =	*b*	0.7930	1.0005	2.05	2.3674	3.8
Eta o Alpha (parametro de escala o vida característica) =	*η*	16.018	18.267	20.610	20.600	20.201
MTTR = h * Gamma G (1+ 1/b) =	*MTTR*	18.26	18.26	18.26	18.26	18.26
	t-to (Datos de falla en horas, con t_o = 0)	Valores de Curvas de Mantenibilidad *M (t)*				
	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	1	10.49%	5.32%	0.20%	0.08%	0.00%
	10	49.75%	42.15%	20.31%	16.53%	6.68%
	20	69.65%	66.54%	60.95%	60.64%	61.81%
	30	80.69%	80.65%	88.46%	91.24%	98.88%
	40	87.33%	88.82%	97.96%	99.19%	100.00%
	50	91.51%	93.53%	99.79%	99.97%	100.00%
	60	94.21%	96.26%	99.99%	100.00%	100.00%
	70	96.01%	97.84%	100.00%	100.00%	100.00%
	80	97.21%	98.75%	100.00%	100.00%	100.00%
	90	98.04%	99.28%	100.00%	100.00%	100.00%
	100	98.61%	99.58%	100.00%	100.00%	100.00%
	150	99.72%	99.97%	100.00%	100.00%	100.00%
	200	99.94%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	250	99.99%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	300	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	400	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	500	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



94 Con lo cual se descalifica mucho el método puntual, cuando se requieren desarrollar estrategias y acciones concretas de mantenimiento y producción, definitivamente es mejor utilizar las distribuciones para el análisis de la confiabilidad y la mantenibilidad. Aparte de Weibull existen infinitas distribuciones, de las cuales muchas son útiles y simulan adecuadamente tanto la confiabilidad como la mantenibilidad y, por ende la disponibilidad, para condiciones particulares y específicas; entre las más relevantes sobresalen:

Ilustración 46 - Distribuciones para estimación CM

Distribución	*Criterios*
Normal	**- Describe fenómenos de envejecimiento de equipos (Díaz, 1992). - Describe fenómenos de modelos de fatiga (Ebeling,2005) - Describe fenómenos naturales (Ramakumar, 1996). - Los componentes son afectados desde un comienzo por el desgaste (Rojas, 1975).**
Exponencial	**- Las reparaciones constituyen un intercambio de piezas estándar. - Fallas aleatorias y que no dependan del tiempo que lleve en funcionamiento. - Describe situaciones de función de tasa de falla constante (Rojas, 1975). - El componente usado que aún no ha fallado, es estadísticamente tan bueno como un componente nuevo. - Modelar componentes electrónicos (Díaz, 1992). Es un caso particular de la Gamma cuando βeta = 1.**
Weibull	**- Es la única función de probabilidad que puede utilizarse para representar cualquier tipo de distribución (Kelly y otro,1998,24). - Representar la vida de los componentes. - Vida de servicio de tubos y equipos electrónicos (Rojas, 1975).**
Gamma	**- Conveniente para caracterizar los tiempos de fallas de equipos durante períodos de rodaje (Rojas,197592). - Adecuada para representar sistemas con componentes *stand-by* (Díaz, 1992).**
Log normal	**- Describe bien cuando la mayor parte de las intervenciones son de corta duración (Díaz,1992). - Aplicada para equipos electrónicos y electromecánicos (Blanchard,1994). - Se aproxima a la distribución exponencial, y siendo ésta mucho más sencilla de manejar, es esta última la que más se utiliza.**
Binomial	**- Se aplica en eventos mutuamente excluyentes, falla o no falla (Lewis, 1995).**
Poisson	**- Frecuentemente usada en gestión de inventarios. - Se usa también en lugar de la distribución binomial cuando se manejan probabilidades de fallas bajas (Díaz,1992).**
Beta	**- Usada principalmente en procesos acotados en dos extremos (Díaz, 1992).**
Erlang	**- Es un caso especial de la distribución gamma, K entero (Díaz, 1992).**
Rayleigh	**- Es un caso especial de la distribución Weibull, β=2 (Ebeling, 2005).**
Chi cuadrada	**- Es un caso especial de la distribución gamma, λ=0.5, y $n = 2a$ (Leemis, 1995).**
Valores Extremos	**- Es usada en modelos que limitan los valores máximos y mínimos (Díaz, 1992).**

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Una vez se elige el cálculo de la disponibilidad a utilizar, se procede a la estimación de los parámetros mediante una o dos distribuciones en función de la necesidad específica; la calidad de la selección depende de la prueba bondad de ajuste[153] (*Goodness of Fit - Test*, diferencia entre la realidad y los valores obtenidos de la distribución asumida para los diferentes tiempos *t*) la cual califica el grado de acierto en la simulación lograda con la selección que se adopta.

Es importante volver a resaltar la importancia de tener una gran cantidad de datos de fallas, tiempos útiles, reparaciones, etc., siquiera al menos en una cifra total de *MTBF* en tiempo mayor a 10 veces el *MTTR*, indudablemente entre mayor sea la cantidad de datos[154], la estimación del parámetro es más cercana al valor real (Lewis, 1995).

Los métodos para realizar la estimación de los parámetros de una distribución pueden ser simples o complejos, entre los simples destacan el gráfico y el de mínimos cuadrados (regresión o alineación (i-kaésimo, rango de medianas por tabla o por aproximación de Benard y, el de Kaplan-Meier)), en tanto uno más complejo es el Método de Máxima Verosimilitud *MLE* (Reliasoft@, 2008). Todos ellos con excepción de *MLE*, requieren el cálculo previo de la alineación y de la estimación de la no confiabilidad y de la mantenibilidad.

2.5.3.1 Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad y de la mantenibilidad.

Para estimar ambos parámetros es necesario obtener los porcentajes acumulados para cada tiempo de falla *F(t)* y para cada ítem de reparación *M(t)*; entre los métodos existentes que enuncia el modelo propuesto para el cálculo de la no confiabilidad y de la mantenibilidad, son: i-kaésimo, el rango de mediana (por tabla y el de Benard por aproximación) y el estimador de Kaplan-Meier.

2.5.3.1.1 Método i-kaésimo o Estimador No Sesgado[155]

Para valorar la función de no confiabilidad se utiliza el estimador

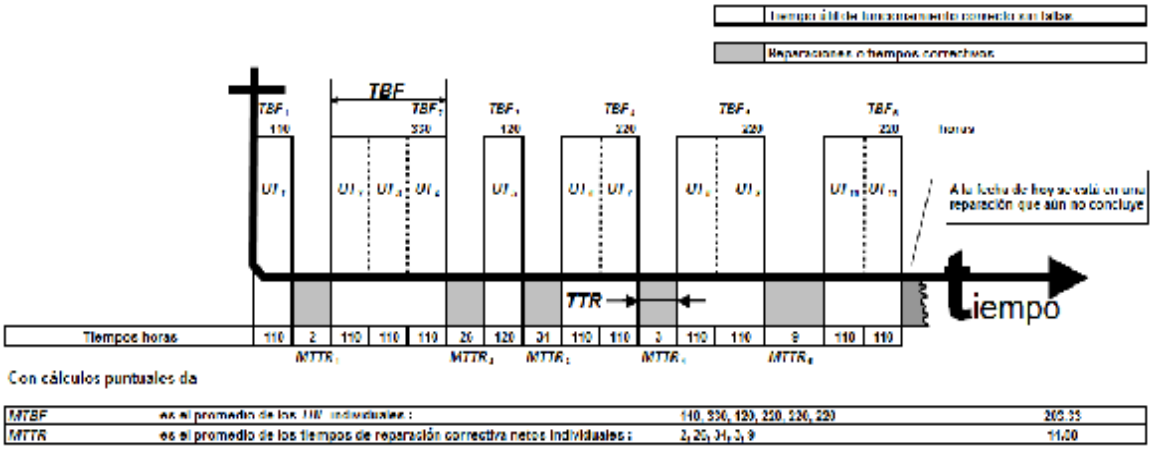
Ecuación 17 - Método de estimación i-kaésimo para A_I

$F(t_i) = 1 - R(t_i) = \frac{j}{N+1}$, donde N es el número total de datos, *j* es el número consecutivo del dato que se evalúa, cuando la muestra es muy grande o tiende a infinito se puede usar $F(t) = j/N$

(Rojas, 1975)

Para el caso particular del ejemplo de disponibilidad inherente que se trae, se tiene:

Ejemplo 10 - Método de estimación i-kaésimo para A_I



[153] *Entre las más utilizadas figuran Anderson-Darling, Kolmogórov-Smirnov y Chi cuadrado.*
[154] *Mayor a treinta y un elementos (Levin, 1996).*
[155] *El nombre de estimador no sesgado se le reconoce también al i-kaésimo (Díaz, 1992).*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Método i-kaésimo

No Confiabilidad

No. Dato j	Datos de operación sin fallas en horas	*F(t)* = j / (N + 1)	F(t) con aproximación Rango Medianas Benard	*R(t)* = 1 - *F(t)* de i-kaésimo
1	110	14.29%	10.91%	85.71%
2	330	28.57%	26.46%	71.43%
3	120	42.86%	42.14%	57.14%
4	220	57.14%	57.86%	42.86%
5	220	71.43%	73.56%	28.57%
6	220	85.71%	89.09%	14.29%
	Ordenar de menor a mayor			
	Media	50.00%	50.00%	

Mantenibilidad

No. Dato j	Datos de reparaciones en horas	*M(t)* = j / (N + 1) de i-kaésimo
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
	Ordenar de menor a mayor	
	Media	50.00%

De esta forma se obtienen las curvas de no confiabilidad, confiabilidad y mantenibilidad por el método i-kaésimo de aproximación para conocer los valores porcentuales acumulados de *F(t)*, *R(t)* y *M(t)* respectivamente.

2.5.3.1.2 Método de Rango de Medianas - Tabla

El método se usa para obtener una estimación de la no confiabilidad para cada falla o en mantenibilidad para cada reparación. Éste es el valor que la probabilidad real de falla debe tener para la enésima falla o en una reparación para la enésima tarea correctiva, para una muestra de N datos con un nivel de confianza del 50%. Esto significa esencialmente que éste es el mejor estimativo para la no confiabilidad, en una población de datos.

El rango se puede ser encontrar para cualquier punto de porcentaje P, mayor a cero y menor a uno, al resolver la distribución binomial acumulada para Z, cuyo resultado representa el rango, o estimado de la no confiabilidad, para la enésima falla; o del estimado de la mantenibilidad para la enésima reparación.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 47 - Tabla de valores de F(t) y de M(t) para Rango de Medianas – Tabla

j \ N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N \ j
1	0.5000	0.2929	0.2063	0.1591	0.1295	0.1091	0.0943	0.0830	0.0741	0.0670	0.0611	0.0561	0.0519	0.0483	0.0452	0.0424	0.0400	0.0378	0.0358	0.0341	0.0325	0.0310	0.0297	0.0285	0.0274	1
2		0.7071	0.5000	0.3857	0.3138	0.2645	0.2285	0.2011	0.1796	0.1623	0.1480	0.1360	0.1258	0.1170	0.1094	0.1027	0.0968	0.0915	0.0868	0.0825	0.0786	0.0751	0.0719	0.0690	0.0662	2
3			0.7937	0.6143	0.5000	0.4214	0.3641	0.3205	0.2862	0.2586	0.2358	0.2167	0.2005	0.1865	0.1743	0.1637	0.1542	0.1458	0.1383	0.1315	0.1253	0.1197	0.1146	0.1099	0.1055	3
4				0.8409	0.6862	0.5786	0.5000	0.4402	0.3931	0.3551	0.3238	0.2976	0.2753	0.2561	0.2394	0.2247	0.2118	0.2002	0.1899	0.1806	0.1721	0.1644	0.1573	0.1509	0.1449	4
5					0.8706	0.7356	0.6359	0.5598	0.5000	0.4517	0.4119	0.3785	0.3502	0.3258	0.3045	0.2859	0.2694	0.2547	0.2415	0.2297	0.2189	0.2091	0.2002	0.1919	0.1844	5
6						0.8909	0.7715	0.6795	0.6069	0.5483	0.5000	0.4595	0.4251	0.3954	0.3697	0.3471	0.3270	0.3092	0.2932	0.2788	0.2657	0.2538	0.2430	0.2330	0.2238	6
7							0.9057	0.7989	0.7138	0.6449	0.5881	0.5405	0.5000	0.4652	0.4348	0.4082	0.3847	0.3637	0.3449	0.3280	0.3126	0.2986	0.2858	0.2741	0.2632	7
8								0.9170	0.8204	0.7414	0.6762	0.6215	0.5749	0.5349	0.5000	0.4694	0.4423	0.4182	0.3966	0.3771	0.3594	0.3433	0.3286	0.3151	0.3027	8
9									0.9259	0.8377	0.7642	0.7024	0.6498	0.6046	0.5652	0.5306	0.5000	0.4727	0.4483	0.4263	0.4063	0.3881	0.3715	0.3562	0.3422	9
10										0.9330	0.8520	0.7833	0.7247	0.6743	0.6303	0.5918	0.5577	0.5273	0.5000	0.4754	0.4531	0.4329	0.4143	0.3973	0.3816	10
11											0.9389	0.8640	0.7996	0.7439	0.6955	0.6530	0.6153	0.5818	0.5517	0.5246	0.5000	0.4776	0.4572	0.4384	0.4211	11
12												0.9439	0.8742	0.8135	0.7606	0.7141	0.6730	0.6363	0.6034	0.5737	0.5469	0.5224	0.5000	0.4795	0.4605	12
13													0.9481	0.8830	0.8257	0.7753	0.7306	0.6908	0.6551	0.6229	0.5937	0.5671	0.5428	0.5205	0.5000	13
14														0.9517	0.8906	0.8364	0.7882	0.7453	0.7068	0.6721	0.6406	0.6119	0.5857	0.5616	0.5395	14
15															0.9548	0.8973	0.8458	0.7998	0.7585	0.7212	0.6874	0.6567	0.6285	0.6027	0.5789	15
16																0.9576	0.9032	0.8542	0.8101	0.7703	0.7343	0.7014	0.6714	0.6438	0.6184	16
17																	0.9601	0.9085	0.8617	0.8195	0.7811	0.7462	0.7142	0.6849	0.6579	17
18																		0.9622	0.9132	0.8685	0.8279	0.7909	0.7570	0.7259	0.6973	18
19																			0.9642	0.9175	0.8747	0.8356	0.7999	0.7670	0.7368	19
20																				0.9659	0.9214	0.8803	0.8427	0.8081	0.7762	20
21																					0.9675	0.9249	0.8854	0.8491	0.8157	21
22																						0.9690	0.9281	0.8901	0.8551	22
23																							0.9703	0.9311	0.8945	23
24																								0.9715	0.9338	24
25																									0.9727	25
j \ N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N \ j

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

j \ N	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	N \ j
1	0.0263	0.0254	0.0245	0.0236	0.0228	0.0221	0.0214	0.0208	0.0202	0.0196	0.0191	0.0186	0.0181	0.0176	0.0172	0.0168	0.0164	0.0160	0.0156	0.0153	0.0150	0.0146	0.0143	0.0141	0.0138	1
2	0.0637	0.0614	0.0592	0.0572	0.0553	0.0536	0.0519	0.0503	0.0489	0.0475	0.0462	0.0450	0.0438	0.0427	0.0416	0.0406	0.0396	0.0387	0.0379	0.0370	0.0362	0.0355	0.0347	0.0340	0.0333	2
3	0.1015	0.0978	0.0944	0.0912	0.0881	0.0853	0.0827	0.0802	0.0779	0.0757	0.0736	0.0716	0.0698	0.0680	0.0663	0.0647	0.0632	0.0617	0.0603	0.0590	0.0577	0.0565	0.0553	0.0542	0.0531	3
4	0.1394	0.1343	0.1296	0.1252	0.1210	0.1172	0.1136	0.1102	0.1069	0.1039	0.1011	0.0984	0.0958	0.0934	0.0910	0.0888	0.0867	0.0847	0.0828	0.0810	0.0793	0.0776	0.0760	0.0744	0.0730	4
5	0.1774	0.1709	0.1648	0.1592	0.1540	0.1491	0.1445	0.1401	0.1360	0.1322	0.1286	0.1251	0.1218	0.1187	0.1158	0.1130	0.1103	0.1078	0.1054	0.1030	0.1008	0.0987	0.0966	0.0947	0.0928	5
6	0.2153	0.2074	0.2001	0.1933	0.1869	0.1809	0.1754	0.1701	0.1651	0.1605	0.1561	0.1519	0.1479	0.1442	0.1406	0.1372	0.1339	0.1308	0.1279	0.1251	0.1224	0.1198	0.1173	0.1149	0.1127	6
7	0.2533	0.2440	0.2354	0.2274	0.2199	0.2128	0.2063	0.2001	0.1943	0.1888	0.1836	0.1786	0.1740	0.1696	0.1654	0.1614	0.1575	0.1539	0.1504	0.1471	0.1439	0.1409	0.1380	0.1352	0.1325	7
8	0.2912	0.2806	0.2707	0.2614	0.2528	0.2447	0.2372	0.2301	0.2234	0.2170	0.2111	0.2054	0.2001	0.1950	0.1901	0.1855	0.1812	0.1770	0.1730	0.1692	0.1655	0.1620	0.1587	0.1555	0.1524	8
9	0.3292	0.3171	0.3059	0.2955	0.2858	0.2767	0.2681	0.2601	0.2525	0.2453	0.2386	0.2322	0.2261	0.2204	0.2149	0.2097	0.2048	0.2000	0.1955	0.1912	0.1871	0.1831	0.1794	0.1757	0.1722	9
10	0.3671	0.3537	0.3412	0.3296	0.3187	0.3086	0.2990	0.2900	0.2816	0.2736	0.2661	0.2590	0.2522	0.2458	0.2397	0.2339	0.2284	0.2231	0.2181	0.2133	0.2087	0.2043	0.2000	0.1960	0.1921	10
11	0.4051	0.3903	0.3765	0.3637	0.3517	0.3405	0.3299	0.3200	0.3107	0.3019	0.2936	0.2858	0.2783	0.2712	0.2645	0.2581	0.2520	0.2462	0.2406	0.2353	0.2303	0.2254	0.2207	0.2163	0.2120	11
12	0.4431	0.4269	0.4118	0.3978	0.3846	0.3724	0.3609	0.3500	0.3398	0.3302	0.3211	0.3125	0.3044	0.2966	0.2893	0.2823	0.2756	0.2693	0.2632	0.2574	0.2518	0.2465	0.2414	0.2365	0.2318	12
13	0.4810	0.4634	0.4471	0.4318	0.4176	0.4043	0.3918	0.3800	0.3690	0.3585	0.3487	0.3393	0.3305	0.3221	0.3141	0.3065	0.2992	0.2923	0.2857	0.2794	0.2734	0.2676	0.2621	0.2568	0.2517	13
14	0.5190	0.5000	0.4824	0.4659	0.4506	0.4362	0.4227	0.4100	0.3981	0.3868	0.3762	0.3661	0.3565	0.3475	0.3389	0.3307	0.3229	0.3154	0.3083	0.3015	0.2950	0.2888	0.2828	0.2771	0.2715	14
15	0.5570	0.5366	0.5176	0.5000	0.4835	0.4681	0.4536	0.4400	0.4272	0.4151	0.4037	0.3929	0.3826	0.3729	0.3637	0.3549	0.3465	0.3385	0.3308	0.3236	0.3166	0.3099	0.3035	0.2973	0.2914	15
16	0.5949	0.5732	0.5529	0.5341	0.5165	0.5000	0.4845	0.4700	0.4563	0.4434	0.4312	0.4197	0.4087	0.3983	0.3884	0.3791	0.3701	0.3616	0.3534	0.3456	0.3381	0.3310	0.3242	0.3176	0.3113	16
17	0.6329	0.6097	0.5882	0.5682	0.5494	0.5319	0.5155	0.5000	0.4854	0.4717	0.4587	0.4464	0.4348	0.4237	0.4132	0.4032	0.3937	0.3846	0.3760	0.3677	0.3597	0.3521	0.3448	0.3379	0.3311	17
18	0.6708	0.6463	0.6235	0.6023	0.5824	0.5638	0.5464	0.5300	0.5146	0.5000	0.4862	0.4732	0.4609	0.4492	0.4380	0.4274	0.4173	0.4077	0.3985	0.3897	0.3813	0.3733	0.3655	0.3581	0.3510	18
19	0.7088	0.6829	0.6588	0.6363	0.6154	0.5957	0.5773	0.5600	0.5437	0.5283	0.5138	0.5000	0.4870	0.4746	0.4628	0.4516	0.4410	0.4308	0.4211	0.4118	0.4029	0.3944	0.3862	0.3784	0.3709	19
20	0.7468	0.7195	0.6941	0.6704	0.6483	0.6276	0.6082	0.5900	0.5728	0.5566	0.5413	0.5268	0.5130	0.5000	0.4876	0.4758	0.4646	0.4539	0.4436	0.4338	0.4245	0.4155	0.4069	0.3987	0.3907	20
21	0.7847	0.7560	0.7294	0.7045	0.6813	0.6595	0.6392	0.6200	0.6019	0.5849	0.5688	0.5536	0.5391	0.5254	0.5124	0.5000	0.4882	0.4769	0.4662	0.4559	0.4461	0.4366	0.4276	0.4189	0.4106	21
22	0.8227	0.7926	0.7646	0.7386	0.7142	0.6915	0.6701	0.6500	0.6311	0.6132	0.5963	0.5804	0.5652	0.5508	0.5372	0.5242	0.5118	0.5000	0.4887	0.4779	0.4676	0.4578	0.4483	0.4392	0.4305	22
23	0.8606	0.8291	0.7999	0.7727	0.7472	0.7234	0.7010	0.6800	0.6602	0.6415	0.6238	0.6071	0.5913	0.5763	0.5620	0.5484	0.5354	0.5231	0.5113	0.5000	0.4892	0.4789	0.4690	0.4595	0.4503	23
24	0.8985	0.8657	0.8352	0.8067	0.7801	0.7553	0.7319	0.7100	0.6893	0.6698	0.6514	0.6339	0.6174	0.6017	0.5868	0.5726	0.5591	0.5462	0.5338	0.5221	0.5108	0.5000	0.4897	0.4797	0.4702	24
25	0.9363	0.9022	0.8704	0.8408	0.8131	0.7872	0.7628	0.7400	0.7184	0.6981	0.6789	0.6607	0.6435	0.6271	0.6116	0.5968	0.5827	0.5692	0.5564	0.5441	0.5324	0.5211	0.5103	0.5000	0.4901	25
j \ N	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	N \ j

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

j \ N	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	N \ j
26	0.9737	0.9386	0.9056	0.8748	0.8460	0.8191	0.7937	0.7699	0.7475	0.7264	0.7064	0.6875	0.6695	0.6525	0.6364	0.6210	0.6063	0.5923	0.5789	0.5662	0.5540	0.5423	0.5310	0.5203	0.5099	26
27		0.9747	0.9408	0.9089	0.8790	0.8510	0.8247	0.7999	0.7766	0.7547	0.7339	0.7143	0.6956	0.6779	0.6611	0.6451	0.6299	0.6154	0.6015	0.5882	0.5755	0.5634	0.5517	0.5405	0.5298	27
28			0.9756	0.9428	0.9119	0.8828	0.8556	0.8299	0.8058	0.7830	0.7614	0.7410	0.7217	0.7034	0.6859	0.6693	0.6535	0.6385	0.6241	0.6103	0.5971	0.5845	0.5724	0.5608	0.5497	28
29				0.9764	0.9447	0.9147	0.8865	0.8599	0.8349	0.8113	0.7889	0.7678	0.7478	0.7288	0.7107	0.6935	0.6772	0.6615	0.6466	0.6323	0.6187	0.6056	0.5931	0.5811	0.5695	29
30					0.9772	0.9465	0.9173	0.8899	0.8640	0.8395	0.8165	0.7946	0.7739	0.7542	0.7355	0.7177	0.7008	0.6846	0.6692	0.6544	0.6403	0.6268	0.6138	0.6013	0.5894	30
31						0.9779	0.9481	0.9198	0.8931	0.8678	0.8440	0.8214	0.8000	0.7796	0.7603	0.7419	0.7244	0.7077	0.6917	0.6765	0.6619	0.6479	0.6345	0.6216	0.6093	31
32							0.9786	0.9497	0.9221	0.8961	0.8715	0.8481	0.8260	0.8050	0.7851	0.7661	0.7480	0.7307	0.7143	0.6985	0.6834	0.6690	0.6552	0.6419	0.6291	32
33								0.9792	0.9511	0.9243	0.8989	0.8749	0.8521	0.8304	0.8099	0.7903	0.7716	0.7538	0.7368	0.7206	0.7050	0.6901	0.6759	0.6622	0.6490	33
34									0.9798	0.9525	0.9264	0.9017	0.8782	0.8559	0.8347	0.8145	0.7952	0.7769	0.7594	0.7426	0.7266	0.7113	0.6965	0.6824	0.6689	34
35										0.9804	0.9538	0.9284	0.9042	0.8813	0.8594	0.8387	0.8189	0.8000	0.7819	0.7647	0.7482	0.7324	0.7172	0.7027	0.6887	35
36											0.9809	0.9551	0.9303	0.9067	0.8842	0.8628	0.8425	0.8230	0.8045	0.7867	0.7698	0.7535	0.7379	0.7230	0.7086	36
37												0.9814	0.9562	0.9320	0.9090	0.8870	0.8661	0.8461	0.8270	0.8088	0.7913	0.7746	0.7586	0.7432	0.7285	37
38													0.9819	0.9573	0.9337	0.9112	0.8897	0.8692	0.8496	0.8308	0.8129	0.7957	0.7793	0.7635	0.7483	38
39														0.9824	0.9584	0.9353	0.9133	0.8922	0.8721	0.8529	0.8345	0.8169	0.8000	0.7838	0.7682	39
40															0.9828	0.9594	0.9368	0.9153	0.8947	0.8749	0.8561	0.8380	0.8207	0.8040	0.7881	40
41																0.9832	0.9604	0.9383	0.9172	0.8970	0.8776	0.8591	0.8413	0.8243	0.8079	41
42																	0.9836	0.9613	0.9397	0.9190	0.8992	0.8802	0.8620	0.8446	0.8278	42
43																		0.9840	0.9622	0.9410	0.9208	0.9013	0.8827	0.8648	0.8476	43
44																			0.9844	0.9630	0.9423	0.9224	0.9034	0.8851	0.8675	44
45																				0.9847	0.9638	0.9435	0.9240	0.9053	0.8874	45
46																					0.9850	0.9646	0.9447	0.9256	0.9072	46
47																						0.9854	0.9653	0.9458	0.9271	47
48																							0.9857	0.9660	0.9469	48
49																								0.9860	0.9667	49
50																									0.9862	50
j \ N	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	N \ j

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Recuérdese que entre más alto sea el valor de *F(t)* o de *M(t)*, más crítico es y por lo tanto más atractivo para el analista o planeador de mantenimiento.

El rango se puede ser encontrar para cualquier punto de porcentaje P, mayor a cero y menor a uno, al resolver la distribución binomial acumulada para Z, cuyo resultado representa el rango, o estimado de la no confiabilidad, para la enésima falla; o del estimado de la mantenibilidad para la enésima reparación.

Ecuación 18 - Ecuación de la distribución binomial acumulada, para la estimación por Rango de Medianas puro. Tabla

$$P = \sum_{j=1}^{N} \binom{N}{j} Z^{j} (1-Z)^{N-j}$$

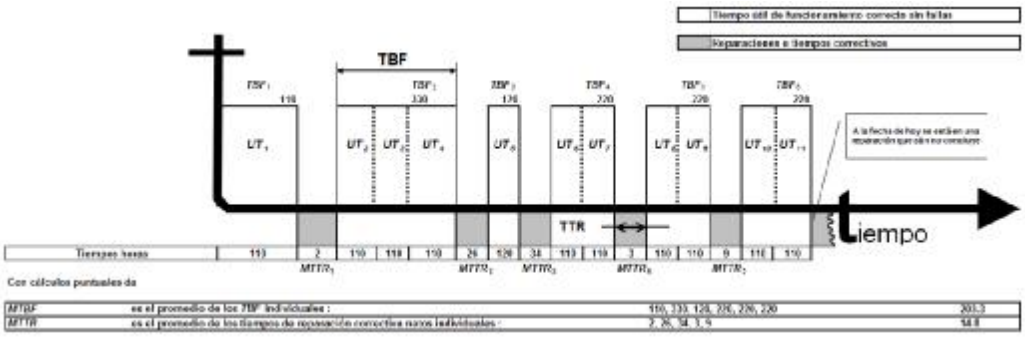
Donde N es el número de datos de la muestra, j posición de la falla en orden ascendente.

$$0.5 = \sum_{j=i}^{N} \binom{N}{j} Z^{j} (1-Z)^{N-j}$$

(Reliasoft@, 2008)

Ejemplo 11 - Método de estimación de Rango de Medianas Tabla para A_I

Los cálculos con la Tabla de Rango de Medianas se estiman en el mismo ejemplo que se desarrolla, mediante la lectura cruzada de los valores porcentuales en forma horizontal con el número total de datos N y con el evento *j* en forma vertical.



Método Rango de Medianas Tabla

No Confiabilidad

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas TBF	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	*F(t)* con Rango Mediana Tabla	*R(t)* = 1 - *F(t)* con Rango Mediana Tabla
1	110	110	10.91%	89.09%
2	330	120	26.45%	73.56%
3	120	220	42.14%	57.86%
4	220	220	57.86%	42.14%
5	220	220	73.56%	26.45%
6	220	330	89.09%	10.91%
		Ordenar de menor a mayor		
		Media	50.00%	50.00%

Mantenibilidad

No. Dato	Datos de reparacioness - μ - en horas TTR	Organizados μ	*M(t)* con Aproximación de Rango de Medianas Benard	*M(t)* = Método Tabla Rango de Mediana
1	2	2	12.96%	12.95%
2	26	3	31.48%	31.38%
3	34	9	50.00%	50.00%
4	3	26	68.52%	68.62%
5	9	34	87.04%	87.06%
		Ordenar de menor a mayor		
		Media	50.00%	50.00%

2.5.3.1.3 Método Benard de aproximación de Rango de Medianas

El rango de mediana también puede ser estimado de una manera más sencilla, pero un poco menos precisa a través de la aproximación de Benard (ReliaSoft@,2000).

Ecuación 19 - Aproximación de Benard para el Rango de Mediana

$$R-M = \frac{j-0.3}{N+0.4} =$$

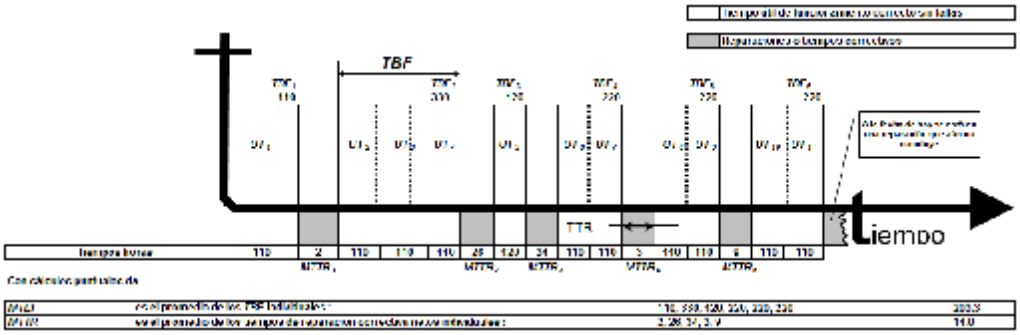
, donde: *R-M*: es el estimador de no confiabilidad o mantenibilidad de rango de mediana; j: posición del dato ordenado de menor a mayor.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

N: número total de datos.

(Reliasoft@, 2008)

Ejemplo 12 - Método de estimación de no confiabilidad o mantenibilidad por Aproximación de Rango de Medianas Benard para A_I.



Método Aproximación de Rango de Medianas Benard

No Confiabilidad

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas TBF	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	*F(t)* con Aproximación Rango Mediana Benard	*F(t)* con aproximación Rango Medianas TABLA	*R(t)* = 1 - *F(t)* con Rango Mediana TABLA
1	110	110	10.94%	10.91%	89.09%
2	330	120	26.56%	26.45%	73.55%
3	120	220	42.19%	42.14%	57.86%
4	220	220	57.81%	57.86%	42.14%
5	220	220	73.44%	73.56%	26.44%
6	220	330	89.06%	89.09%	10.91%
		Ordenar de menor a mayor			
		Media	50.00%	50.00%	50.00%

Mantenibilidad

No. Dato	Datos de reparacioness - *μ* - en horas TTR	Organizados *μ*	M(t) con Aproximación de Rango de Medianas Benard	*M(t)* con Rango de Mediana TABLA	*M(t)* = n / (N + 1) Método i-kaésimo
1	2	2	12.96%	12.95%	16.67%
2	26	3	31.48%	31.38%	33.33%
3	34	9	50.00%	50.00%	50.00%
4	3	26	68.52%	68.62%	66.67%
5	9	34	87.04%	87.06%	83.33%
		Ordenar de menor a mayor			
		Media	50.00%	50.00%	50.00%

2.5.3.1.4 Método Kaplan-Meier[156] o K-M

Es un método alternativo al estimador de rango de mediana, para calcular el valor de la no confiabilidad que también utiliza el número de datos de la muestra(Vallejo, y otros, 2004).

Ecuación 20 - Método de estimación Kaplan-Meier para A_I

$$K-M = 1-\prod_{j=1}^{N}\frac{N-j}{N-j+1},$$ donde K-M: estimado de no confiabilidad o mantenibilidad de Kaplan-Meier; j: posición del dato ordenada de menor a mayor; N: número total de datos.

(Reliasoft@, 2008)

El estimador de Kaplan–Meier tiene la desventaja de dar en el último valor una no confiabilidad o mantenibilidad de cero, por lo cual su fórmula se ha modificado para que pueda usarse en los modelos de estimación gráfica y de mínimos cuadrados (NS@, 2005).

Ecuación 21 - Método de estimación Kaplan-Meier Modificado para A_I

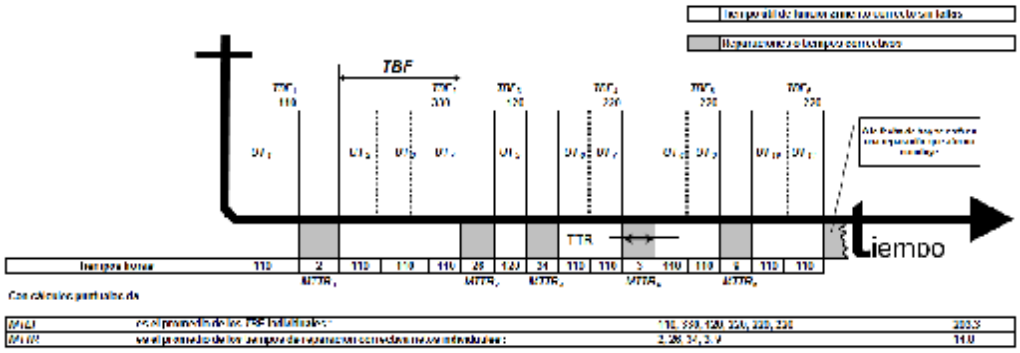
$$K-M\ M = 1-\frac{N+0.7}{N+0.4}\prod_{j=1}^{N}\frac{N-j+0.7}{N-j+1.7},$$ donde K-M M es el estimado de no confiabilidad o mantenibilidad de Kaplan-Meier Modificado; j: posición del dato ordenado de menor a mayor y N: número total de datos

(NS@, 2005)

[156] *Se hace referencia en el documento con la abreviación K-M, para referirse al estimado de Kaplan-Meier.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ejemplo 13 - Método de estimación de no confiabilidad o mantenibilidad de Kaplan-Meier Modificado para A_I.



Método Kaplan-Meier Modificado

No Confiabilidad

$$K-MM=1-\frac{N+0.7}{N+0.4}\prod_{j=1}^{N}\frac{N-j+0.7}{N-j+1.7}$$

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas *TBF*	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	*F(t)* con Kaplan-Meier Modificado K-M	*F(t)* con aproximación Rango Medianas Benard	*R(t)* = 1 - *F(t)* con Kaplan-Meier Modificado
1	110	110	10.94%	10.94%	89.06%
2	330	120	23.12%	26.56%	76.88%
3	120	220	36.64%	42.19%	63.36%
4	220	220	51.60%	57.81%	48.40%
5	220	220	68.10%	73.44%	31.90%
6	220	330	86.25%	89.06%	13.75%
		Ordenar de menor a mayor			
		Media	46.11%	50.00%	53.89%

Mantenibilidad

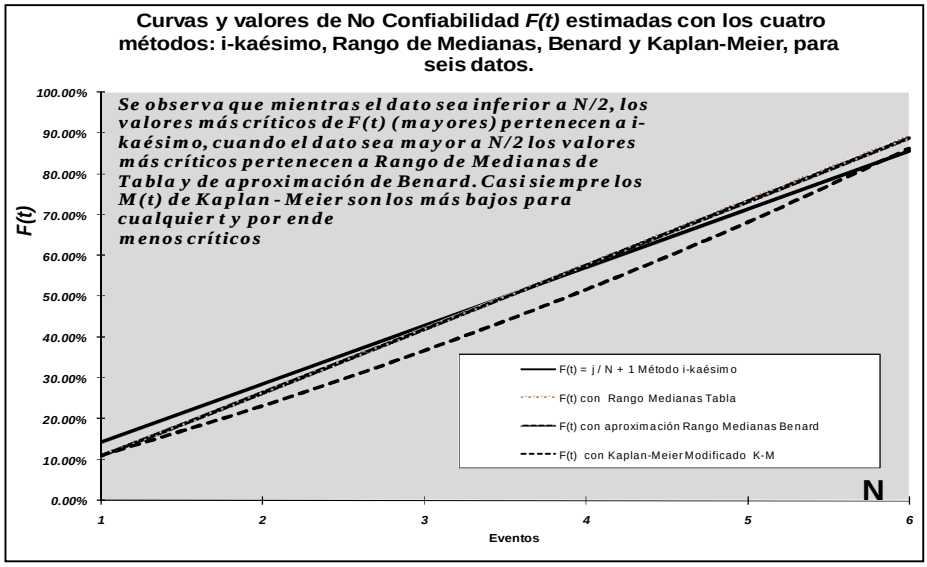
No. Dato	Datos de reparaciones - μ - en horas *TTR*	Ordenados de μ	*M(t)* con Kaplan-Meier Modificado	*M(t)* = n / (N + 1) Método i-kaésimo	*M(t)* con Rango de Mediana TABLA	*M(t)* = con aproximación Rango Medianas Benard
1	2	2	12.96%	16.67%	12.95%	12.96%
2	26	3	27.67%	33.33%	31.38%	31.48%
3	34	9	44.29%	50.00%	50.00%	50.00%
4	3	26	62.97%	66.67%	68.62%	68.52%
5	9	34	83.91%	83.33%	87.06%	87.04%
		Ordenar de menor a mayor				
		Media	46.36%	50.00%	50.00%	50.00%

Cálculos en detalle

No confiabilidad
$K-MM_1=1-\frac{6+0.7}{6+0.4}*\frac{6-1+0.7}{6-1+1.7}=10.94\%$
$K-MM_2=1-\frac{6+0.7}{6+0.4}*\frac{6-2+0.7}{6-2+1.7}*(1-10.94\%)=23.12\%$
$K-MM_3=1-\frac{6+0.7}{6+0.4}*\frac{6-3+0.7}{6-3+1.7}*(1-23.12\%)=36.64\%$
$K-MM_4=1-\frac{6+0.7}{6+0.4}*\frac{6-4+0.7}{6-4+1.7}*(1-36.64\%)=51.60\%$
$K-MM_5=1-\frac{6+0.7}{6+0.4}*\frac{6-5+0.7}{6-5+1.7}*(1-51.60\%)=68.10\%$
$K-MM_6=1-\frac{6+0.7}{6+0.4}*\frac{6-6+0.7}{6-6+1.7}*(1-68.10\%)=86.25\%$

Mantenibilidad
$K-MM_1=1-\frac{5+0.7}{5+0.4}*\frac{5-1+0.7}{5-1+1.7}=12.96\%$
$K-MM_2=1-\frac{5+0.7}{5+0.4}*\frac{5-2+0.7}{5-2+1.7}*(1-12.96\%)=27.67\%$
$K-MM_3=1-\frac{5+0.7}{5+0.4}*\frac{5-3+0.7}{5-3+1.7}*(1-27.67\%)=44.29\%$
$K-MM_4=1-\frac{5+0.7}{5+0.4}*\frac{5-4+0.7}{5-4+1.7}*(1-44.29\%)=62.97\%$
$K-MM_5=1-\frac{5+0.7}{5+0.4}*\frac{5-5+0.7}{5-5+1.7}*(1-62.97\%)=83.91\%$

Ejemplo 14 - Curvas y valores de No Confiabilidad F(t) estimadas por los cuatro métodos descritos



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

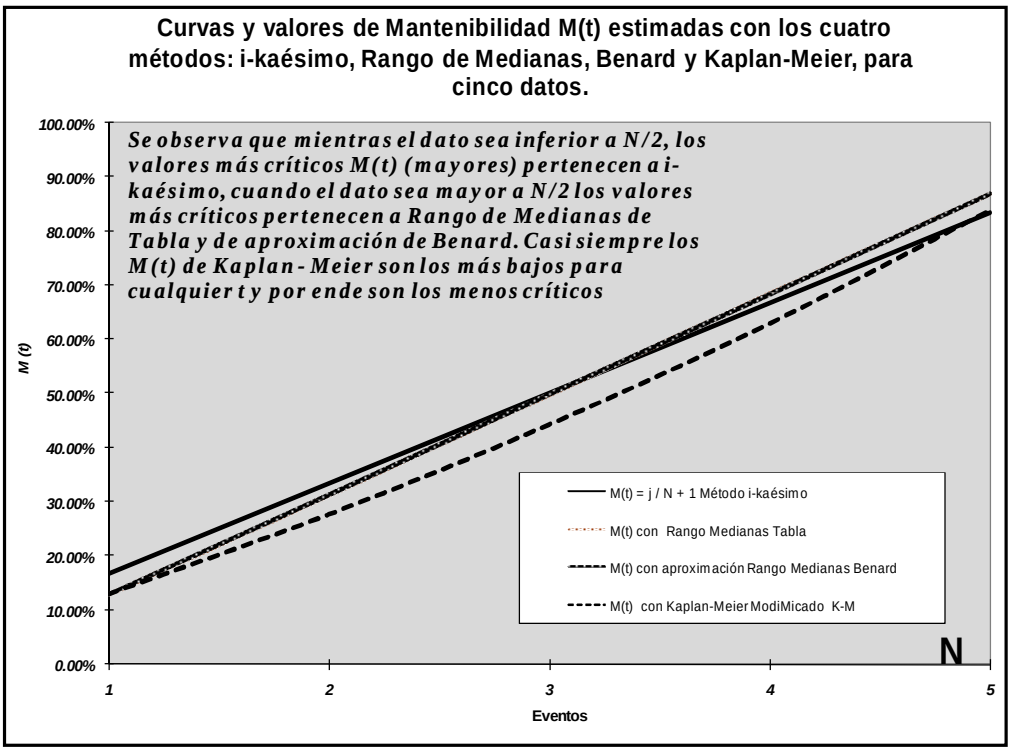
No. Dato *j*	Datos de operación sin fallas (en horas) *TBF*	Datos de operación sin fallas. Ordenados de menor a mayor	*F(t)* = j / N + 1 Método i-kaésimo	*F(t)* con Rango Medianas Tabla	*F(t)* con aproximación Rango Medianas Benard	*F(t)* con Kaplan-Meier Modificado K-M
1	110	110	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	330	120	28.57%	26.45%	26.56%	23.12%
3	120	220	42.86%	42.14%	42.19%	36.64%
4	220	220	57.14%	57.86%	57.81%	51.60%
5	220	220	71.43%	73.56%	73.44%	68.10%
6	220	330	85.71%	89.09%	89.06%	86.25%
		Media	50.00%	50.00%	50.00%	46.11%

Dado que existen tres *UT* iguales, por norma se asume el que tenga un *F(t)* más crítico o sea el más alto y los dos menores se eliminan, como si no existiesen, por lo cual la Función de no Confiabilidad queda para los cuatro métodos, así

No. Dato *j*	Datos de operación sin fallas (en horas) *TBF*	Datos de operación sin fallas. Ordenados de menor a mayor	*F(t)* = j / N + 1 Método i-kaésimo	*F(t)* con Rango Medianas Tabla	*F(t)* con aproximación Rango Medianas Benard	*F(t)* con Kaplan-Meier Modificado K-M
1	110	110	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	330	120	28.57%	26.45%	26.56%	23.12%
5	220	220	71.43%	73.56%	73.44%	68.10%
6	220	330	85.71%	89.09%	89.06%	86.25%

Casi siempre, los valores a seleccionar (los más altos que son los más críticos), se dan en el método i-kaésimo hasta la primera mitad de los datos N y de ahí en adelante ocurren con el método Rango de Mediana Tabla.

Ejemplo 15 - Curvas y valores de Mantenibilidad M(t) estimadas por los cuatro métodos descritos



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

No. Dato *j*	Datos de operación sin Mallas (en horas) *TBM*	Datos de operación sin Mallas. Ordenados de menor a mayor	*M(t)* = j / N + 1 Método i-kaésimo	*M(t)* con Rango Medianas Tabla	*M(t)* con aproximación Rango Medianas Benard	*M(t)* con Kaplan-Meier ModiMicado K-M
1	2	2	16.67%	12.95%	12.96%	12.96%
2	26	3	33.33%	31.38%	31.48%	27.67%
3	34	9	50.00%	50.00%	50.00%	44.29%
4	3	26	66.67%	68.62%	68.52%	62.97%
5	9	34	83.33%	87.06%	87.04%	83.91%
		Media	50.00%	50.00%	50.00%	46.36%

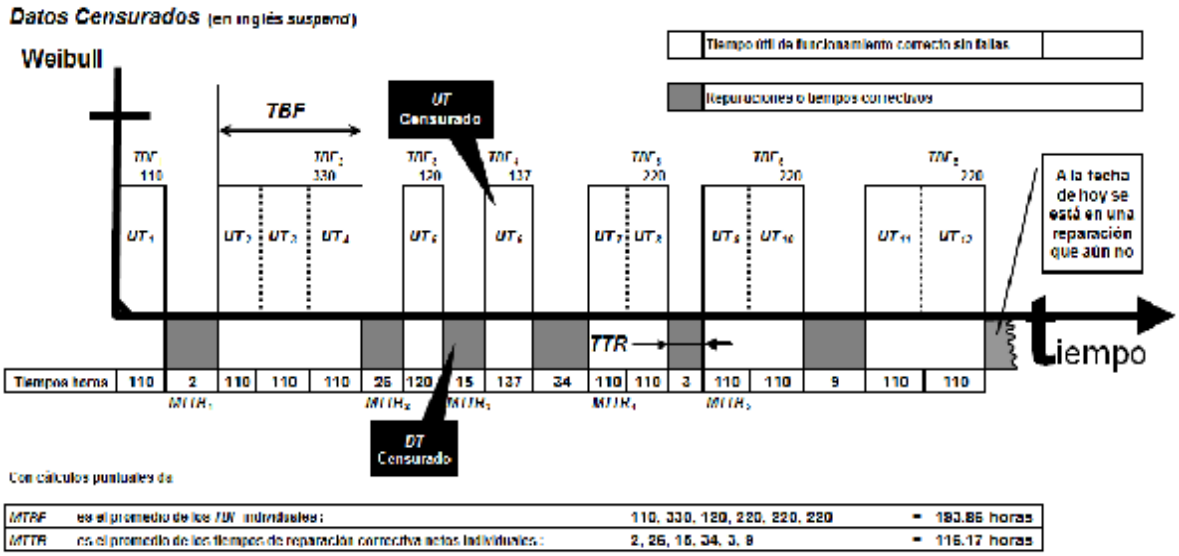
Nótese que en ambos *F(t)* y *M(t)* casos, la media de Kaplan-Meier no alcanza el 50%, lo que se ratifica en las gráficas de *F(t)* (sin eliminar los UT iguales) y en *M(t)*, al ser la gráfica que siempre está por debajo con menores valores.

2.5.3.1.5 Estimación de no confiabilidad y mantenibilidad con datos censurados

El manejo de datos en ocasiones implica una gran incertidumbre estadística, pero aún así los datos son útiles en el análisis de Weibull o de otras distribuciones, esta incertidumbre puede provenir de varias fuentes: cuando se tienen gran cantidad de elementos para probar hasta la falla pero solo se cuenta con recursos económicos para unos cuantos o no se dispone de mucho tiempo; cuando los elementos o dispositivos que se analizan no alcanzan el estado de falla o avería al momento de hacer los cálculos de estimación y parametrización; cuando las pruebas (*test)* contra la falla se suspenden porque las condiciones de la prueba se alteran; cuando los datos obtenidos son de dudosa procedencia o no presentan la calidad de obtención adecuada. En general es necesario hacer estimaciones aproximadas con el fin de poder completar el análisis CMD en Weibull; para compensar la incertidumbre en tales datos es necesario realizar un censurado o ajuste en el nuevo cálculo del valor de posición *j* de los datos ordenados, con el fin de calcular *F(t)* o *M(t)* en el caso de reparaciones; necesario para poder estimar los parámetros.

Un método usado para tal fin es el método de los incrementos, que consiste en calcular nuevamente los valores de posición del número *j* de elementos fallados de acuerdo con un nuevo número de orden asignado; el proceso parte de la clasificación de los elementos como censurados o no censurados, luego genera un incremento a partir de dicha clasificación y finalmente asigna un nuevo Número de Orden de acuerdo con el incremento obtenido al valor de j el cual se denomina Número de Orden y es equivalente al N tratado hasta el momento en las cuatro estimaciones presentadas (Kelly, y otros, 1998).

Ejemplo 16 - Método de estimación de No Confiabilidad con datos censurados para A_I.



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Estimación de No Confiabilidad con datos censurados con los cuatro métodos

1	2	3	4	5	6	7				
No. Dato	Horas de operación sin fallar (en horas)	[illegible]	Horas de operación sin fallar, organizados con λ ascendiente	CLASE Prueba O.K. (pone F) o test fallido (coloca S)	Incremento	Número de orden N	Método i-kaésimo $F(t)=\frac{j}{N+1}$	Método Tabla Rango de Medianas [illegible]	Método Benard $F(t)=\frac{j-0.3}{N+0.4}$	Método Kaplan-Meier Modificado $F(t)=K-MM=1-\frac{N+0.7}{N+0.4}\prod_{j=1}^{N}\frac{N-j+0.7}{N-j+1.7}$
1	110	F	110	F	1.000	1.000	14.29%	9.43%	9.46%	10.94%
2	330	F	120	F	1.000	2.000	28.57%	22.85%	22.97%	23.12%
3	120	F	137	S						
4	137	S	220	F	1.200	3.200	45.71%	39.13%	39.19%	34.55%
5	220	S	220	F	1.200	4.400	62.86%	55.44%	55.41%	47.73%
6	220	F	220	F	1.200	5.600	80.00%	71.73%	71.62%	63.16%
7	220	F	330	F	1.200	6.800	97.14%	87.89%	87.84%	81.84%
	7	datos				Media	46.94%	47.74%	46.93%	52.51%

$$Incremento = \frac{N+1-(Número\ de\ Orden\ del\ elemento\ anterior\ que\ falló)}{N+1-(Número\ de\ elementos\ anteriores)}$$

$$Número\ de\ Orden = Incremento + Número\ de\ Orden\ anterior$$

Dado que existen tres UT repetidos, la función de no confiabilidad *F(t)* queda transformada para los datos censurados en:

1	4	5	6	7				
No. Dato	Horas de operación sin fallos, organizados con λ ascendente	CLASE Prueba O.K. (pone F) o test fallido (coloca S)	Incremento	Número de orden N	Método i-kaésimo $F(t)=\frac{j}{N+1}$	Método Tabla Rango de Medianas $P=\sum_{j=i}^{N}\binom{N}{j}z^j(1-z)^{N-j}$ $0.5=\sum_{j=i}^{N}\binom{N}{j}z^j(1-z)^{N-j}$	Método Benard $F(t)=\frac{j-0.3}{N+0.4}$	Método Kaplan-Meier Modificado $F(t)=K-MM=1-\frac{N+0.7}{N+0.4}\prod_{j=1}^{N}\frac{N-j+0.7}{N-j+1.7}$
1	110	F	1.000	1.000	14.29%	9.43%	9.46%	10.94%
2	120	F	1.000	2.000	28.57%	22.85%	22.97%	23.12%
3	137	S						
6	220	F	1.200	5.600	80.00%	71.73%	71.62%	63.16%
7	330	F	1.200	6.800	97.14%	87.89%	87.84%	81.84%

El primer paso es ordenar los datos de tiempos útiles de menor a mayor, lo que se hace en la columna 4. En las columnas 3 y 5 (ordenada) se coloca si el dato es censurado (S) o no (F)[157], el paso posterior consiste en definir el incremento con la fórmula:

Ecuación 22 - Cálculos del Incremento y Número de Orden, en métodos de estimación de datos censurados

$$Incremento = \frac{N+1-(Número\ de\ Orden\ del\ elemento\ anterior\ que\ falló)}{N+1-(Número\ de\ elementos\ anteriores)}$$

, por ejemplo para el dato 1 es:

$$Incremento\ del\ dato\ 1 = \frac{N+1-(No.\ orden\ del\ elemento\ anterior\ que\ falló_0)}{N+1-(No.\ elementos\ anteriores)} = \frac{7+1-0}{7+1-0} = 1$$

lo que corresponde al valor vertical 1 de la columna 6; el valor del Número de Orden de la columna 6 se determina mediante la expresión:

$$Número\ de\ Orden = Incremento + Número\ de\ Orden\ anterior$$

Para el dato 1

$$Número\ de\ Orden_1 = Incremento_1 + Número\ de\ Orden\ anterior_0 = 1+0 = 1$$

Para los demás datos, los cálculos se trabajan así:

$$Incremento\ del\ dato\ 2 = \frac{N+1-(No.\ orden\ del\ elemento\ anterior\ que\ falló_1)}{N+1-(No.\ elementos\ anteriores)} = \frac{7+1-1}{7+1-1} = 1$$

$$Número\ de\ Orden\ dato\ 2 = Incremento_2 + Número\ de\ Orden\ anterior_1 = 1+1 = 2$$

[157] *Son datos de entrada del análisis.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Para los datos censurados no se calcula ni el Incremento ni el Número de Orden, es como si no existiesen.

$$Incremento\ del\ dato\ 4 = \frac{N+1-(No.\ orden\ del\ elemento\ anterior\ que\ falló_2)}{N+1-(No.\ elementos\ anteriores)} = \frac{7+1-2}{7+1-3} = 1.20$$

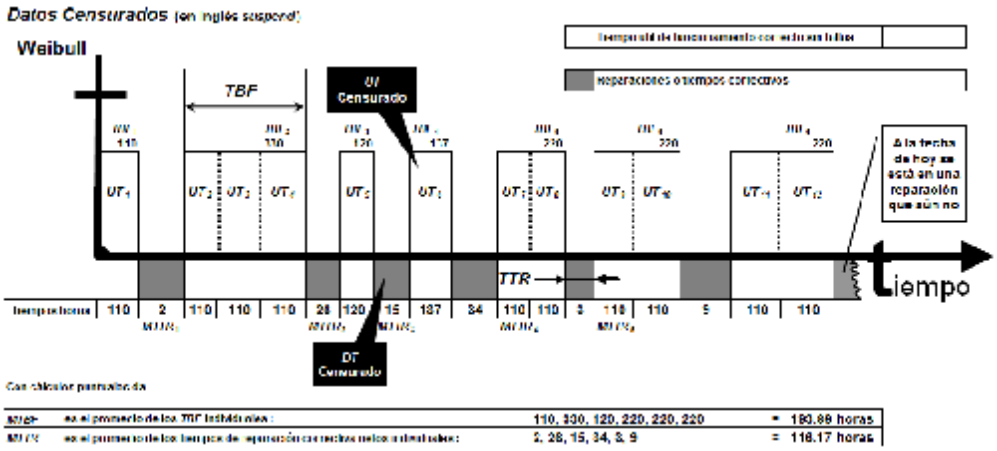
$$Número\ de\ Orden\ dato\ \ 4 = Incremento_4 + Número\ de\ Orden\ anterior_2 = 1+2 = 3$$

y así sucesivamente hasta llegar al dato donde j = N. Nótese que solo hay cambios en Incremento y Número de Orden después de que aparece un dato censurado, cuando no lo hay el incremento sigue constante.

(Kelly, y otros, 1998)

Para la estimación de Mantenibilidad se realizan los mismos pasos que en No Confiabilidad.

Ejemplo 17 - Método de estimación de Mantenibilidad con datos censurados para A_I



Estimación de Mantenibilidad con datos censurados con los cuatro métodos

1	2	3	4	5	6	7				
No. Dato	Datos de operación sin fallas (en horas)	Censurado o No	Horas de operación sin fallos, organizados con λ ascendente	CLASE Prueba O.K. (pone F) o test fallido (coloca S)	Incremento	Número de orden N	Método i-kaésimo $M(t) = \frac{j}{N+1}$	Método Tabla Rango de Medianas $P = \sum_{j=1}^{N} \binom{N}{j} t^{j}(1-t)^{N-j}$ $0.5 = \sum_{j=1}^{N} \binom{N}{j} t^{j}(1-t)^{N-j}$	Método Benard $M(t) = \frac{j-0.3}{N+0.4}$	Método Kaplan-Meier Modificado $M(t) = K - MM = 1 - \frac{N+0.7}{N+0.4} \prod_{j=1}^{N} \frac{N-j+0.7}{N-j+1.7}$
1	2	F	2	F	1.000	1.000	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	26	F	3	F	1.000	2.000	28.57%	26.45%	26.56%	23.12%
3	15	F	9	F	1.000	3.000	42.86%	42.14%	42.19%	36.64%
4	34	S	15	S						
5	9	F	26	F	1.333	4.333	61.90%	63.09%	63.02%	53.37%
6	9	F	34	F	1.333	5.667	80.95%	83.95%	83.85%	75.19%
	6	datos				Media	38.0952%	45.3080%	37.7604%	28.4663%

2.5.3.2 *Recomendaciones y mejores prácticas con los métodos de estimación de F(t) y M(t)*

Los análisis hasta ahora realizados permiten concluir aspectos relevantes a la hora de seleccionar los métodos de estimación más convenientes de utilizar en la práctica.

El método de Kaplan-Meier no es recomendable en ningún caso, ya que sus valores tanto en la estimación de no confiabilidad como de mantenibilidad[158] siempre presentan las probabilidades más bajas, y en la realidad se requieren los más altos como valores más críticos, esto se valida al observar los resultados que se presentan en el Ejemplo 14 - Curvas y valores de No Confiabilidad F(t) estimadas por los cuatro métodos descritos y en el Ejemplo 15 - Curvas y valores de Mantenibilidad M(t) estimadas por los cuatro métodos descritos.

Allí se detecta que los valores más críticos son los pertenecientes al estimador no sesgado o i-kaésimo (de la mitad hacia el inicio de los tiempos t) y a los de rango de mediana (en sus versiones tabla binomial y Benard)

[158] *Es mucho más conservador pensar y asumir que la reparación tarda más, que es lo que refleja un M(t) más alto; como también se puede pensar que si se tiene un factor de mantenibilidad más alto, menor es la disponibilidad calculada (al estar en el denominador), lo cual es mucho más prudente.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(hacia la mitad más alta de tiempos t). El autor realiza una estimación con los cuatro métodos con una muestra cualquiera de datos de fallas y reparaciones, que le permite calcular los parámetros de confiabilidad, para varios tamaños muestrales y se obtiene:

Ilustración 48 - Comparación de los cuatro métodos de estimación con diferentes N y, parámetros en Weibull F(t) – No Confiabilidad

N datos	Estimación	i-kaésimo	Rango de Mediana Tabla	Benard	Kaplan-Meier
10	*MTBF*	168.088	161.681	161.826	182.487
	βeta	1.294	1.444	1.440	1.416
	Eta η	181.815	178.218	178.301	200.574
	R	0.9820	0.9815	0.9813	0.9790
	R^2	0.9644	0.9634	0.9630	0.9584
50	*MTBF*	188.138	180.824	181.150	222.360
	βeta	0.840	0.878	0.876	0.898
	Eta η	171.648	169.451	169.533	211.090
	R	0.9933	0.9941	0.9941	0.9935
	R^2	0.9866	0.9882	0.9882	0.9870
100	*MTBF*	174.601	170.725	170.943	207.622
	βeta	0.902	0.927	0.926	0.958
	Eta η	166.139	164.839	164.907	203.647
	R	0.9950	0.9951	0.9951	0.9933
	R^2	0.9900	0.9902	0.9902	0.9867
150	*MTBF*	190.176	188.002	188.135	221.727
	βeta	1.064	1.085	1.084	1.131
	Eta η	194.852	193.970	194.019	231.799
	R	0.9971	0.9958	0.9958	0.9981
	R^2	0.9941	0.9916	0.9917	0.9962

M(t) - Mantenibilidad

N datos	Estimación	i-kaésimo	Benard	Kaplan-Meier	*MLE*
10	βeta	1.206	1.333	1.325	1.630
	Eta η	356.5	350.1	395.3	340.7
	MTTR	334.89	321.72	363.73	304.98
	R^2	0.9606	0.9532	0.9612	
50	βeta	1.266	1.321	1.346	1.726
	Eta η	425.3	421.8	489.4	401.1
	MTTR	395.00	388.30	449.03	357.55
	R^2	0.9718	0.9732	0.9667	
100	βeta	1.345	1.380	1.425	1.706
	Eta η	435.6	433.5	499.9	418.1
	MTTR	399.68	396.03	454.36	372.99
	R^2	0.9803	0.9799	0.9766	

De este experimento se concluyen varias cosas, entre ellas que siempre el *MTBF*, *MTTR*, el βeta y el Eta η obtenidos por Kaplan-Meier son muy desfasados con relación a los del estimador no sesgado i-kaésimo y los de rango de medianas, la prueba R^2 aporta valores adecuados en forma similar en todas las pruebas, casi siempre el βeta obtenido con Kaplan-Meier es muy diferente en todos los casos en comparación con los otros tres estimadores.

Con esto se ratifica la posición del autor de no recomendar el uso del método Kaplan-Meier.

Es importante también comentar que en los ejemplos que se muestran anteriormente, para los cálculos de *F(t)* como para *M(t)* con datos censurados o no, se nota una marcada diferencia entre ellos, se aprecia en ellos que

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

siempre los valores de *F(t)* y *M(t)* son mayores en cada uno de los estimadores obtenidos sin datos censurados, esto plantea la posibilidad de preferir los estudios sin datos censurados; más sin embargo queda pendiente por evaluar el impacto de no tener en cuenta la incidencia de los *UT* y *DT* censurados, en la estimación de los parámetros *MTBF*, *MTBM*, *MTTR*, $\overline{M}$, $\overline{M'}$, entre otros; en las diferentes Disponibilidades que se presentan como posibles, en los diferentes procesos como *NHPP*, *HPP* o predicciones.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2.6 Resumen del Capítulo 2 – Parámetros y Distribuciones - CMD

Esta segunda sección aporta las diferentes metodologías, explicaciones, fundamentos, cálculos, fórmulas, criterios, etc., necesarios, para poder realizar los pasos previos de CMD hasta obtener la alineación del Modelo propuesto como Universal y sus parámetros, con diferentes alternativas mediante los modelos puntuales y de distribuciones.

2.7 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 3

- Argumente y explique, por lo menos tres elementos básicos, que hacen posible considerar al mantenimiento, como una ciencia técnica.
- ¿En qué consiste el sistema kantiano aplicado a mantenimiento industrial, describa por favor sus elementos estructurales y los actores principales en ingeniería de fábricas, al tratarlo bajo este enfoque sistémico?
- Describa las funciones primarias de mantenimiento y producción, explicando en cada caso.
- Construya un triángulo de elementos estructurales de ingeniería de fábricas, estableciendo las reglas de juego que definen sus relaciones abiertas y cerradas.
- Explique las cuatro categorías del mantenimiento bajo un enfoque estratégico sistémico, aclarando en cada nivel cuáles son sus principales metas, logros y alcances.
- Arguya al menos tres métodos de predicción de valores y parámetros CMD, detallando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones.

- Defina confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, como una síntesis de los mejores conceptos de los autores internacionales.
- ¿Cuáles tipos de disponibilidades factibles conoce?, ¿cuáles de ellas dan mayores valores de disponibilidad que las otras y por qué?, explíquelas por favor en detalle y haga un contraste de ventajas y aplicaciones entre ellas.
- Enumere y explique los pasos principales del Modelo Universal para la medición y predicción del CMD, detallando cada etapa y escribiendo en qué consiste.
- ¿En qué casos el $MTBM_C$ de la Disponibilidad Operacional se hace igual al de la Alcanzada y al de la Operacional Generalizada?
- ¿En cuáles ocasiones el $MTTR$ y el M_P de la Disponibilidad Alcanzada se hace igual al de la Inherente, al de la Operacional y al de la Operacional Generalizada?, favor explique y de las razones del porqué.
- ¿Cuándo el $MTBM_P$ de la Disponibilidad Operacional Generalizada se hace igual a al de la Alcanzada, Intrínseca y Operacional Generalizada?
- ¿Por qué siempre el Modelo de Kaplan-Meier es el más desfavorable en criticidad, a la hora de estimar los parámetros y funciones?
- Detalle gráficamente y de las explicaciones estratégicas de todas las zonas de la Curva de Davies o de la Bañera, dando las causas de fallas en cada caso, los comportamientos de los equipos y las estrategias adecuadas en cada caso.
- Describa los rangos de aplicabilidad en función del βeta que se recomienda para las tácticas Reactiva, *TPM*, *RCM* y Proactiva, en la Curva de la Bañera.
- Explique detalladamente las diferentes opciones de Alineación, contrastando sus ventajas, limitaciones y

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

usos adecuados, establezca algunos casos.

- Explique gráfica y conceptualmente, las Curvas de No Confiabilidad, de Confiabilidad o Supervivencia y la de Mantenibilidad, coloque por favor, ejemplos numéricos de lectura puntual en cada gráfica.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3 Parámetros y Distribuciones – CMD

La utilización de la Metodología Universal de cálculo y predicción del CMD, requiere el dominio completo en forma integral y detallada de cada uno de sus pasos, los cuales se abordan desde la unidad anterior, ahora se pretende el conocimiento preciso de los diferentes modelos de parametrización, de cada una de las opciones de distribución a aplicar, de tal manera que se pueda modelar lo más exactamente posible el comportamiento de los tiempos útiles, de fallas y de mantenimientos planeados.

3.1 Objetivo de Capítulo 3

Manejar los diferentes modelos de parametrización, diferenciado las distintas opciones internacionales de distribuciones, susceptibles de utilizar, de tal forma que le permitan al lector hacer gala de los mejores sistemas de cálculo y predicción de las variables CMD futuras, mediante la selección de diferentes caminos y midiendo el grado de bondad de ajuste de los mismos, con el fin de lograr las mejores mediciones bajo modelos de fácil utilización y con las mejores prácticas internacionales en este campo – Nivel 3 – Aplicar – Escala de Bloom, Barret y Gagñé (Gagné@, y otros, 2008).
.

3.2 Introducción a Capítulo 3

La unidad tres de este libro, procura que el lector pueda manejar con objetividad los criterios de selección de las mejores distribuciones, con el fin de parametrizar y construir los modelos de predicción de los valores y funciones CMD, con el fin de pronosticar el comportamiento futuro del mantenimiento y de la operación de las máquinas, líneas de producción o fábricas, donde aplique la medición, de tal forma que pueda establecer las mejores estrategias, tácticas y operaciones futuras de mantenimiento.

3.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 3 – Parámetros y Distribuciones – CMD

Se debe tener un pleno dominio de los modelos de alineación con mínimos cuadrados o regresión, como del modelo *MLE* que no la requiere, al igual de los pasos previos y fundamentales en la predicción del CMD, es importante que el lector pueda diferenciar las ventajas y limitaciones de cada una de las aplicaciones en las diferentes disponibilidades estandarizadas mundialmente, para una mejor claridad y precisión de los resultados; mediante el manejo de cada paso en la estimación de parámetros de las diferentes distribuciones explicadas y de sus chequeos estadísticos, como de bondad de ajuste.

3.3 Estimación de parámetros – Weibull – LogNormal y Normal

Los datos que se analizan mediante las distribuciones, pueden responder a diferentes características, de acuerdo con el tipo y evento de estudio, como por ejemplo el tiempo de funcionamiento del equipo (*MTTF*), el tiempo de operación del sistema (*MTBF*) o el tiempo que tarda en repararse un equipo después de fallar (*MTTR*). Estos tiempos de vida pueden medirse en horas, millas, ciclos de fracaso, ciclos de tensión, o cualquier otra medida con que la vida o exposición del ítem pueda evaluarse (O´Connor, 2002).

En el análisis de los datos de vida y en la ingeniería de confiabilidad, se deben estimar los valores de la probabilidad de falla, la probabilidad de éxito o confiabilidad, la vida media, los parámetros de una distribución o cualquier otro parámetro aplicable, que son los instrumentos que permiten desarrollar estrategias y acciones claras de mantenimiento e ingeniería de fábricas (Reliasoft@, 2008).

La estimación de los parámetros de la distribución se realiza una vez que se selecciona el modelo de distribución para describir los datos; existen dos tipos: estimación puntual, donde se busca el mejor cálculo del parámetro a partir de los datos disponibles; y la estimación del intervalo, donde se miden los límites superior e inferior del parámetro desconocido. Es evidente que a mayor cantidad de datos disponibles, la estimación del parámetro es más cercana al valor verdadero (Lewis, 1995).

Los métodos por medio de los cuales se puede realizar la estimación de los parámetros de una distribución varían

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

entre aquéllos que son más simples y unos más sofisticados; algunos de los más comunes para realizar esta tarea son el método gráfico, el método de mínimos cuadrados (o de regresión) y el método de la Máxima Verosimilitud *MLE*[160] (Reliasoft@, 2008).

Tanto el método gráfico como el de mínimos cuadrados, exigen la estimación previa de la función de no confiabilidad o de mantenibilidad.

3.3.1 Método gráfico de papel de Weibull o Allen-Plait

El procedimiento consiste en graficar los valores de *F(t)* o de *M(t)* en el eje Y, con sus respectivos tiempos *t* en el eje X. La forma que posee el papel Weibull permite conformar una línea recta, a partir de la cual se logra valorar tanto la pendiente como la intersección de la misma con el eje Y vertical; y a partir de estos dos valores, se pueden obtener los parámetros propios de la función Weibull de βeta, Eta, etc.

3.3.2 Fundamentos de la distribución Weibull

Una de las ventajas significativas que posee la distribución Weibull es que es muy manejable y se acomoda a las tres[161] zonas (infancia o rodaje, madurez o vida útil y envejecimiento) de la curva de la bañera o de Davies. La distribución de Weibull posee en su forma general tres parámetros, lo que le da una gran flexibilidad y cuya selección y ajuste adecuado permite obtener mejores ajustes, que con otras distribuciones (Rojas, 1975); estos parámetros son:

- Gamma - Parámetro de posición (g): el más difícil de estimar y por este motivo se asume con demasiada frecuencia que vale cero. Indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula (Forcadas, 1983).
- Eta η- Parámetro de escala o característica de vida útil (h): su valor es determinante para fijar la vida útil del producto o del sistema. Entre más alto las máquinas pueden ser más robustas o de trabajos de mayor duración.
- βeta - Parámetro de forma (b), refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución.

El parámetro βeta permite a la distribución de Weibull tomar diversas formas: cuando β es inferior a 1 se le denomina a esta fase como de mortalidad infantil (tasa de falla decreciente), cuando toma valores cercanos a uno se le describe a la fase con el nombre de vida útil (tasa de falla constante y aleatoria) y en el evento del β tomar valores mayores a 1, se le conoce a la fase como de envejecimiento o de desgaste [162] (tasa de falla creciente) (Díaz, 1992).

Ilustración 49 - Parámetro de forma βeta de Weibull

Valor (b)	**Característica**
$0 < b < 1$	Tasa de falla decreciente
$b = 1$	Distribución Exponencial
$1 < b < 2$	Tasa de Falla creciente, cóncava
$b = 2$	Distribución Rayleigh
$b > 2$	Tasa de Falla creciente, convexa
$3 \leq b \leq 4$	Tasa de Falla creciente se aproxima a la distribución Normal; simétrica

(Mora, 2007a)

[160] *El cual no requiere alineación previa, como si lo requieren los de regresión gráfico o numérico.*
[161] *Igual que la distribución de Hjorth (Hjorth@, 2005)*
[162] *A mayor b, mayor desgaste. Ésta característica puede ser usada para construir formulas de valorización de equipos; aplicando el valor del equipo (estimado según cualquier modelo), el factor 1/ b (Díaz, 1992, 21).*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Para poder usar la parametrización a través del papel Weibull, se debe tener en cuenta que es necesario alinear los valores, para ello se describen las siguientes consideraciones:

3.3.2.1 Curvas características de Weibull

La tasa de fallas expresa la cantidad de averías o reparaciones por unidad de tiempo que ocurren en el tiempo en que se estudia un elemento; se puede escribir de la siguiente manera en el caso particular de la distribución Weibull:

Ecuación 23 - Análisis de tasa de fallas, función de confiabilidad, función de densidad y función acumulada en Weibull

$$l(t) = -\frac{\frac{d[R(t)]}{dt}}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

, la derivada de *R(t)* con respecto a t en el numerador es *f(t)* denominada Función de densidad de probabilidad de fallas o de Falla instantánea en el tiempo t; a su vez *R(t)* es la función de confiabilidad y *λ(t)* es la función de tasa de fallas.

$$R(t) = \exp^{\left[-\int_0^{\infty} l(t)*d(t)\right]}$$

, donde la curva *R(t)* se puede describir en función de *l (t)* de fallas.

Weibull en 1951 escribe la función empírica más sencilla que puede representar mejor una gran variedad de datos reales (Tamborero@, 2005).

$$\int l(t).dt = \left(\frac{t-t_0}{h}\right)^b$$

, donde *t* es el tiempo en cualquier momento y t_o es un tiempo de referencia o parámetro inicial de localización, *η* (eta o alpha) es el parámetro de escala o vida característica y *β*eta es el parámetro de forma, el cual se considera como una medida de dispersión de los datos evaluados en la distribución (en la medida que el Beta sea mayor hay menor dispersión, ocurre en los equipos maduros, muy conocidos o viejos; cuando el *β*eta es bajo denota mucha desviación estándar entre los tiempos de fallas, en general es inverso a la dispersión de los datos de falla). Con esta ecuación se pueden representar muchas formas de confiabilidades y a la vez es de fácil manejo.

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp^{\left[-\int l(t)d(t)\right]} = 1 - \exp^{\left[-\left(\frac{t-t_o}{h}\right)^b\right]}$$

, que representa normalmente la distribución de Weibull y se conoce a *F(t)* como Función acumulativa de Fallas *F(t)*, también válida para *M(t)*.

Por otro lado a

$$f(t) = l(t).R(t) = \frac{dR(t)}{dt} = \frac{b}{h}\left(\frac{t-t_0}{h}\right)^{b-1}.\exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{h}\right)^b\right]$$

, se le denomina como la Función de densidad de probabilidad de fallas o de Falla instantánea en el tiempo t, donde se cumple que la tasa de fallas para esta distribución es:

$$l(t) = \frac{b}{h}\left(\frac{t-t_0}{h}\right)^{b-1}$$

Las expresiones enunciadas en este literal son válidas para rangos donde $(t - t_0) = 0$, cuando este es menor que cero (0) la Función de densidad de probabilidad de fallas o Falla instantánea *f(t)* y la Tasa de Fallas *λ(t)* valen 0.

En el eje vertical Y o eje de las ordenadas se valora la función Ln {Ln (1 / (1 – *F (t)*)}, que es igual a la fórmula *β*eta * Ln (*t*) – *β*eta * Ln (*η*), y en el eje de las abcisas o sea el eje de *t* se tabula la expresión Ln { $t - t_0$ }, donde *t* es el tiempo del evento y t_0 el tiempo mínimo en que empiezan a ocurrir fallas, normalmente es igual a cero. Similar se hace con la función de Mantenibilidad, simplemente se reemplaza *F(t)* por *M(t)* (O´Connor, 2002).

Las constantes que aparecen en las expresiones anteriores tienen una interpretación real y física: t_0 es el

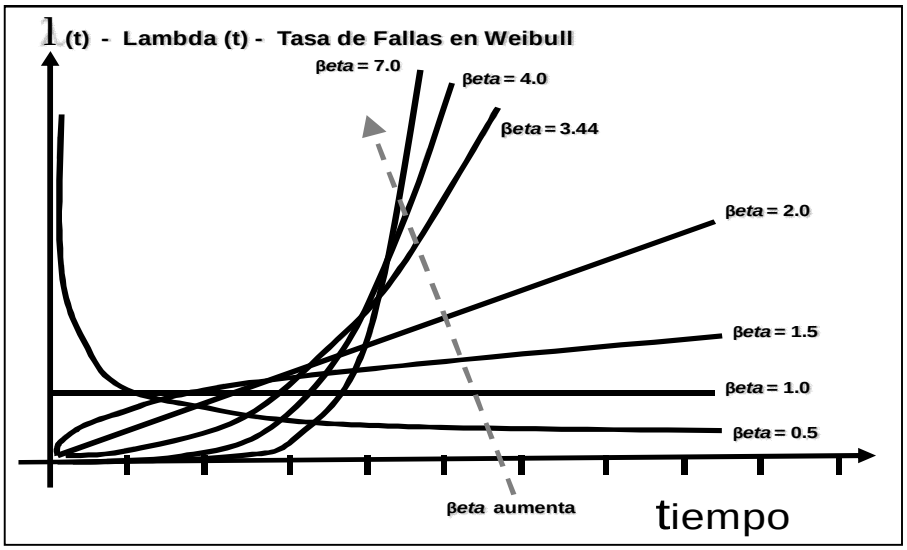
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

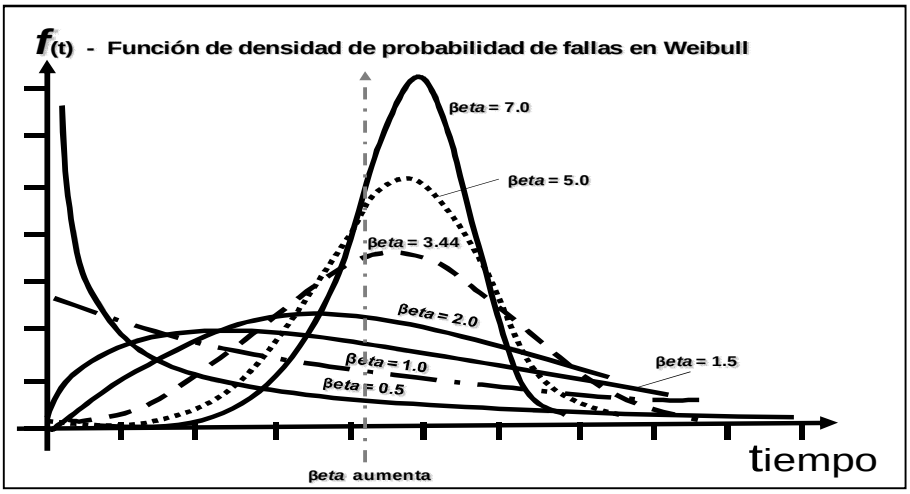
parámetro de posición (unidad de tiempo) en los ejemplos descritos vale 0, es considerado el tiempo de vida mínima y define el punto de partida u origen de la distribución.

El parámetro de escala Eta h es la extensión de la distribución a lo largo del eje del tiempo. Cuando $t - t_0 = h$ y dado que la confiabilidad viene dada por la expresión $R(t=h) = \exp^{\left[-\left(\frac{t-t_0}{h}\right)^b\right]} = \exp^{\left[-\left(\frac{h}{h}\right)\right]^b} = \exp^{[-1]^b} = \frac{1}{\exp^{[1]^b}} = \frac{1}{2.718} = 0.368$ ó 36.8% y la Función acumulativa de fallas es $F(t) = F(h) = 1 - R(t) = 1 - 0.368 = 0.632$ o sea 63.8%.

Entonces la constante representa también el tiempo, medido a partir de t_0 = 0, según lo cual dado que $F(t)$ = 0.632, el 63,2% de la población que se espera que falle, cualquiera que sea el valor de *ß* (ya que como se ha visto su valor no influye en los cálculos realizados). Por esta razón también se le llama usualmente vida característica. El parámetro de forma *ß* representa la pendiente de la recta describiendo el grado de variación de la tasa de fallas y Eta η es la intersección con el eje vertical de probabilidades de falla acumuladas. Esta es la fundamentación para el manejo del papel Weibull.

Ilustración 50 - Gráficas para diferentes βetas de f(t), λ(t) y F(t) en Weibull





PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

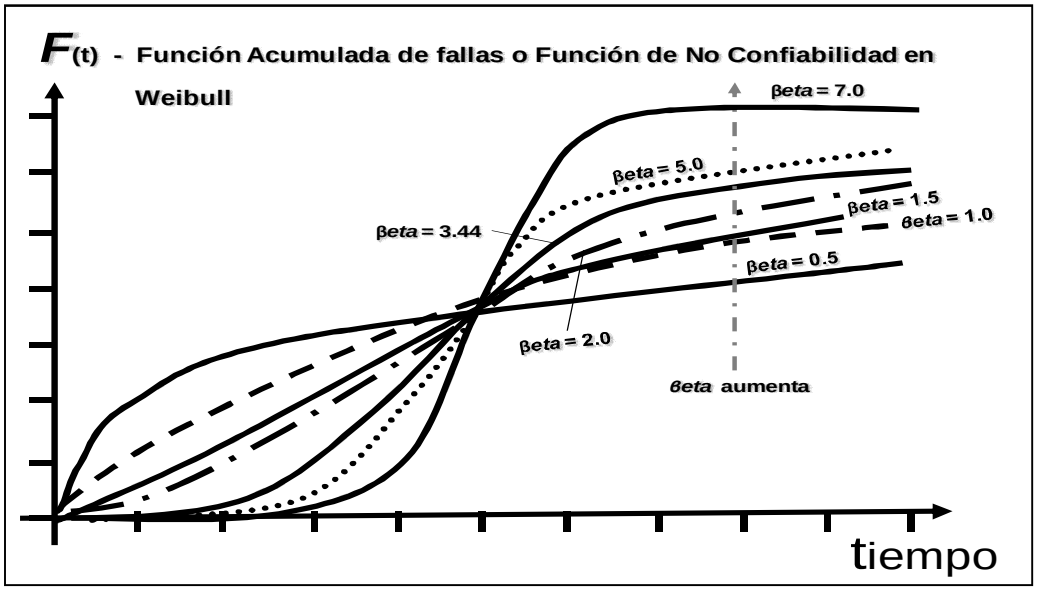
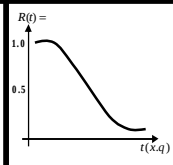
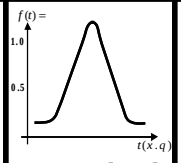
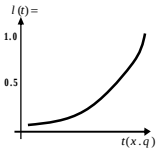
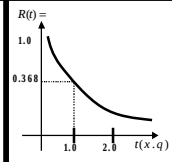
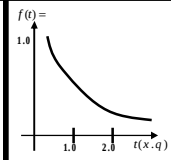
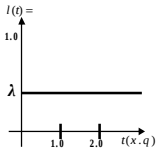
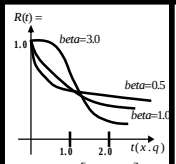
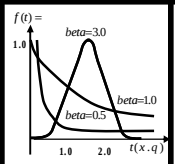
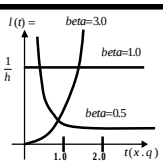
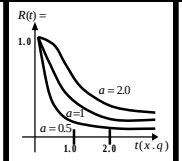
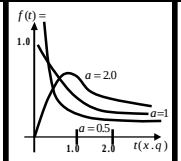
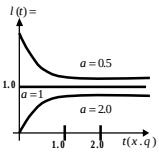


Ilustración 51 - Comportamiento de λ(t), f(t) y F(t) de algunas distribuciones

Distribución	Parámetros	$R(t)=1-F(t)$ Función de Confiabilidad	Función de Densidad de Probabilidad de Falla $f(t)$	$l(t)=\frac{f(t)}{R(t)}$ Función de Tasa de Falla	Sus usos son relevantes en
Normal	Media, μ Desviación estándar, σ	 $R(t)=\int_t^{\infty}\frac{1}{s*\sqrt{2*p}}\exp\left[-\frac{(t-m)^2}{2*s^2}\right]dt$	 $f(t)=\frac{1}{s*\sqrt{2*p}}\exp\left[-\frac{(t-m)^2}{2*s^2}\right]$	 $l(t)=\frac{f(t)}{R(t)}$	*Distribución de vida de elementos o sistemas sometidos a grandes cargas o esfuerzos*
Exponencial	MTBF, θ $\theta = \lambda^{-1}$	 $R(t)=\exp(-l*t)$	 $f(t)=l*\exp(-l*t)$	 $l(t)=l=q^{-1}$	*Distribución de vida de elementos o sistemas complejos no reparables* *Distribución de vida de algunos elementos o sistemas en el período de rodaje, fase I o de mortalidad infantil*
Weibull $f(t)=\frac{t}{\Gamma(a)}(t\,t)^{a-1}\exp(-l\,t)$	Posición, γ Escala, η Forma, β Las curvas de esta ilustración son con $\gamma = 0.0$	 $R(t)=\exp\left[-\left(\frac{t-g}{h}\right)^b\right]$	 $f(t)=\frac{b}{h^b}(t-g)^{b-1}\exp\left[-\left(\frac{t-g}{h}\right)^b\right]$	 $l(t)=\frac{b(t-g)^{b-1}}{h^b}$	*Elementos o sistemas con resistencia a la corrosión* *Distribución de vida de muchos elementos básicos: capacitores, relays, rodamientos, algunos motores, etc.*
Gamma	$SD=\frac{a^{1/2}}{l}$ Cuando a es un número entero, se cumple que: $\Gamma(a)=(a-1)!$	 $R(t)=\frac{l^a}{\Gamma(a)}\int_t^{\infty}t^{a-1}\exp(-t\,t)\,dt$	 $f(t)=\frac{t}{\Gamma(a)}(t\,t)^{a-1}\exp(-l\,t)$	 $l(t)=\frac{f(t)}{R(t)}$	*Distribución de tiempo de vida entre recalibración, ajuste o mantenimiento de equipos* *Distribución de tiempo de vida de elementos con sistemas paralelos o en stand-by*

(Mora, 2007b)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3.3.2.2 Lectura de los parámetros η y β en el papel de Weibull

Un grupo de datos que siga la distribución Weibull, se puede representar mediante una línea recta en el papel que lleva su nombre, al utilizar las ecuaciones presentadas en la Ecuación 17 - Análisis de tasa de fallas, función de confiabilidad, función de densidad y función acumulada en Weibull, si se asume que $t_0 = 0$, que el origen es conocido y que coincide con los datos experimentales.

Ecuación 24 - Ecuaciones de Weibull para alinear los datos y usar el papel de esta distribución

$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-\int l(t).d(t)\right] = \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{h}\right)^b\right] = \exp\left[-\left(\frac{t}{h}\right)^b\right]$ expresión que relaciona la confiabilidad con la no confiabilidad; si se aplica logaritmos neperianos dos veces a ambos lados de la ecuación, esta se transforma en:

$Ln\left(Ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = b * Ln(t) - b * Ln(h)$, para proceder a alinear esta expresión se recuerda que para líneas rectas la ecuación que las gobierna es del tipo $Y = AX + B$ donde A es la pendiente y B es la intersección con el eje Y, al comparar con la expresión anterior de doble logaritmo, se tiene $Y = Ln\left(Ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = b.* n(t) - b * Ln(h) = A * X + B$ como también se puede asociar a $A = b$ y $X = Ln(t)$ como también se asimila $B = b * Ln(h)$, con lo cual se logra la alineación recta completa. Se cumple también que cuando *R(t)*= 0.368 y *F(t)* = 0.6321. Entonces la constante representa también el tiempo, medido a partir de $t_0 = 0$, según lo cual dado que *F (t)* = 0.6321

$Y = Ln\left[Ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right] = 0$, o sea que si se quita la función *Ln* a ambos lados queda, $Ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = 1$ y $\frac{1}{1-F(T)} = e$ de tal modo que

$R(t) = 1 - F(t) = \frac{1}{e} = 1 - \frac{1}{2.7183} = 1 - 0.3679 = 0.6321 (63.21\%)$, según lo cual *F (t)* = 0.632 y se cumple que para t_0=0 se efectúa la alineación con AX + B = 0 y se verifica que $b * X - b * Ln(h) = 0$ y también que $b * X = b * Ln(h)$ de donde $X = Ln(h)$ y dado que se tiene que $X = Ln(t)$ se deduce que $t = \eta$ para cuando *F(t)* = 0.6321; con lo cual *η* se lee directamente en el papel de Weibull para la ordenada 63.21, ya que la escala de abscisas está en forma de *Ln*(*t*).

(Tamborero@, 2005)

Para determinar los parámetros *ß* y *h* se utiliza el papel de Weibull, así:

- *ß*eta es el parámetro de forma y representa la pendiente de la recta. Para obtener el valor de *β*eta se traza una recta paralela a la obtenida con la representación de *t* y *F(t)* que pase por la coordenada donde *F(t)* acumulado de fallas valga 63.2 en la ordenada y *Ln (t)* igual 1 en la abscisa; de allí se puede leer directamente el valor de ß en una escala tabulada de 0 a 7.

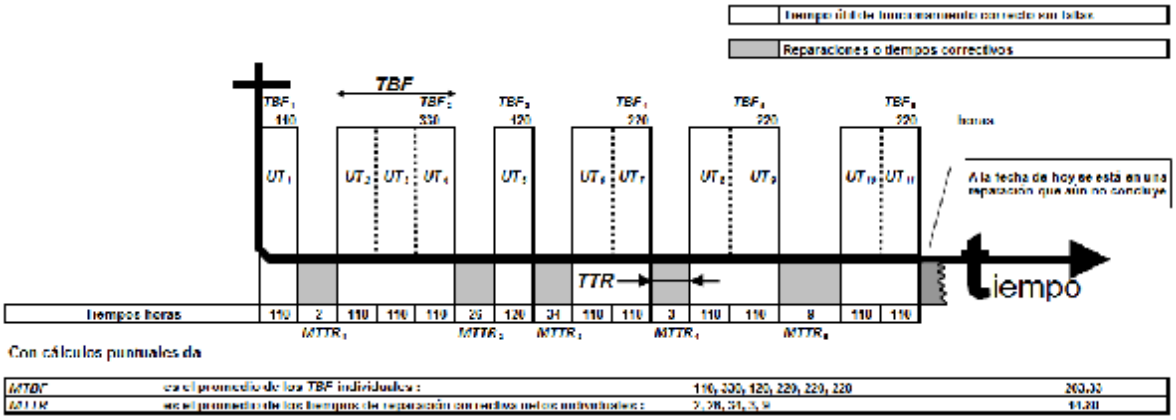
- El valor de *h* es el parámetro de escala y su valor viene dado por la intersección de la recta trazada con la línea paralela al eje de abscisas correspondiente al 63,2 % de fallas acumuladas.

- En efecto se demuestra que para la ordenada $t_0 = 0$ se tiene un *F (t)* = 63,2

A efectos de utilizar el método gráfico se toman los datos del ejemplo de la disponibilidad inherente que se trae en desarrollo, con los *F(t)* y *M(t)* calculados por medio del Ejemplo 10 - Método de estimación i-kaésimo para A_I, pero convertido con los *UT* no repetidos, así:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ejemplo 18 - Ejemplo A_I para uso de papel Weibull



Método i-kaésimo

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	F(t) = j / N + 1
1	110	14.29%
2	120	28.57%
3	220	42.86%
4	220	57.14%
5	220	71.43%
6	330	85.71%
	Media	50.00%

No. Dato j	Datos de reparación en horas	M(t) = j / N + 1
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
	Media	50.00%

Método i-kaésimo con no repetición de UT

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	F(t) = j / N + 1
1	110	14.29%
2	120	28.57%
5	220	71.43%
6	330	85.71%
	Media	50.00%

No. Dato j	Datos de reparación en horas	M(t) = j / N + 1
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
	Media	50.00%

No Confiabilidad

Ln(Ln(1/(1-*F(t)*))) - Y de la regresion	Ln de datos - X de la regresion
-1.86982	4.700
-1.08924	4.787
0.22535	5.394
0.66573	5.799

Mantenibilidad

Ln(Ln(1/(1-*M(t)*))) - Y de la regresion	Ln de datos - X de la regresion
-1.70198	0.693
-0.90272	1.099
-0.36651	2.197
0.09405	3.258
0.58320	3.526

Cálculos con método de regresión en excel

Intersección	-11.742
βeta	2.171
Eta *η*	223.25
MTBF	197.711

Intersección	-1.8708
βeta	0.6355
Eta *η*	18.98
MTTR	26.61

MTBF **= h * Gamma G (1+ 1/b)**

MTTR **= h * Gamma G (1+ 1/b)**

***MTBF* puntual**	**203.300**

***MTTR* puntual**	**14.800**

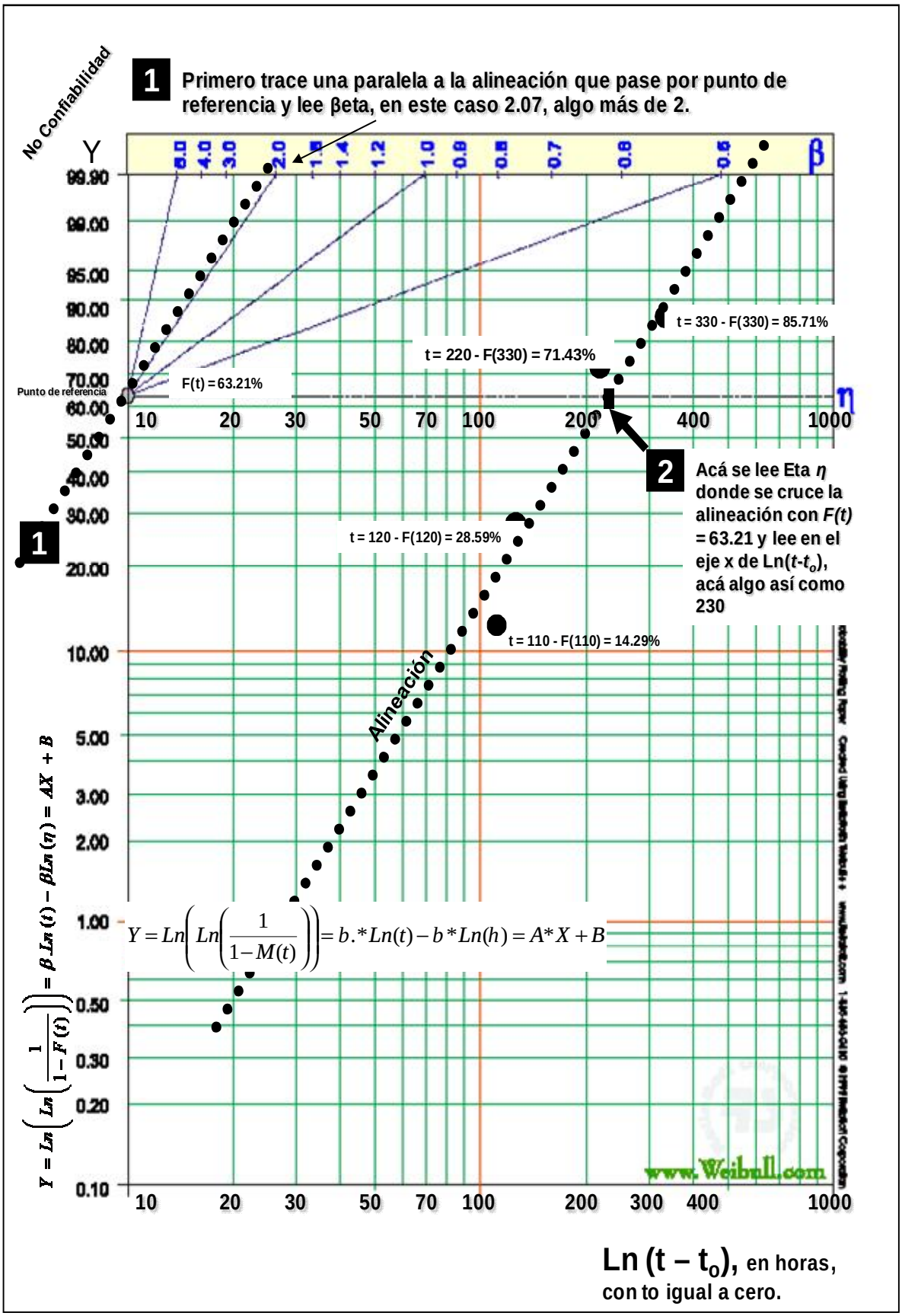
Lectura de Allen - Plait o Papel Weibull

βeta	2.070
Eta *η*	230.00
MTBF	203.734

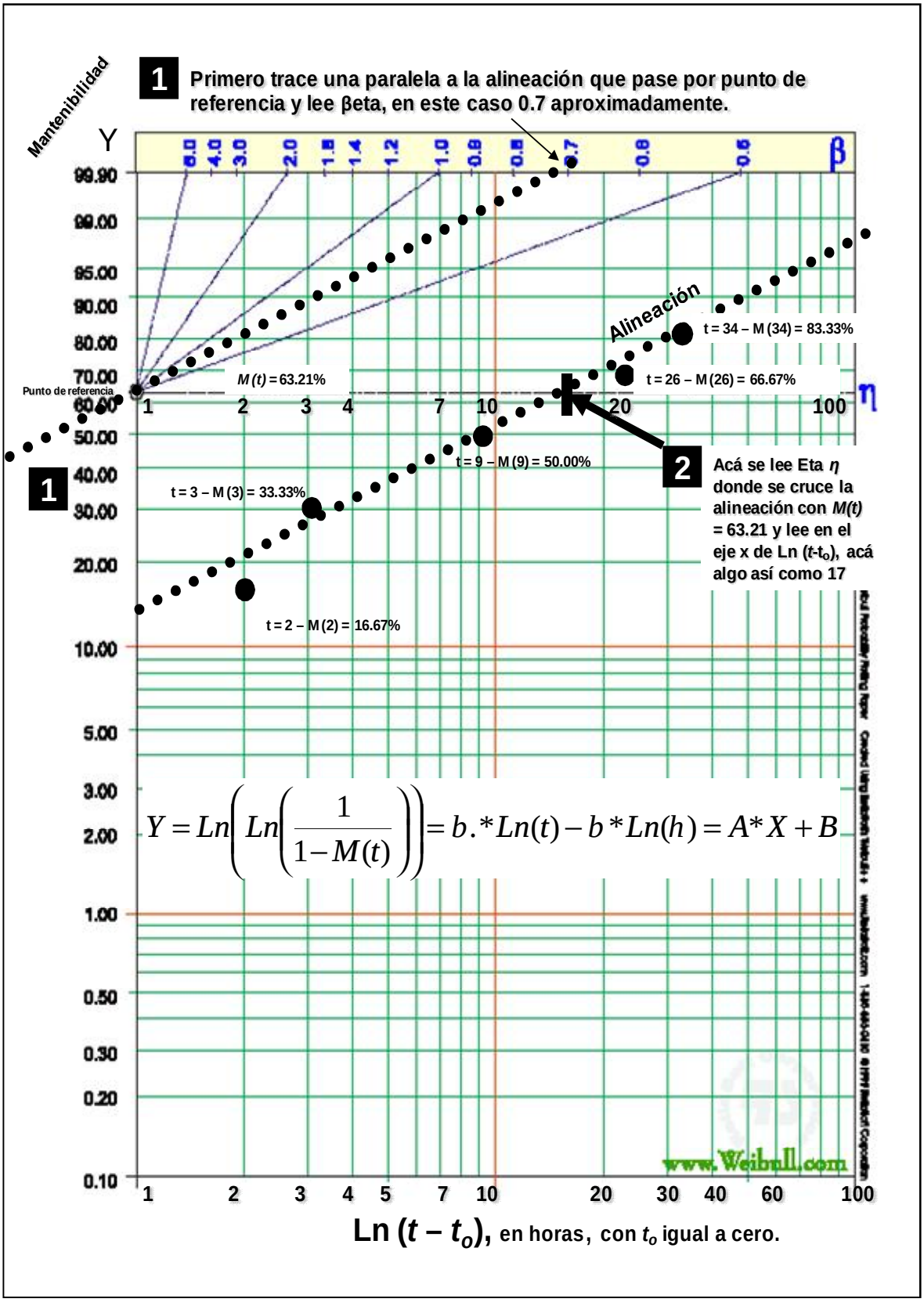
βeta	0.7000
Eta *η*	17.00
MTTR	21.52

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 52 - Papel de Weibull o Allen - Plait



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



A pesar de que los resultados son similares siempre queda de manifiesto que el método de alineación con el método gráfico en este caso de Weibull, es muy subjetivo, lo que puede conducir a errores importantes en el análisis, en la selección de estrategias y acciones de mantenimiento.

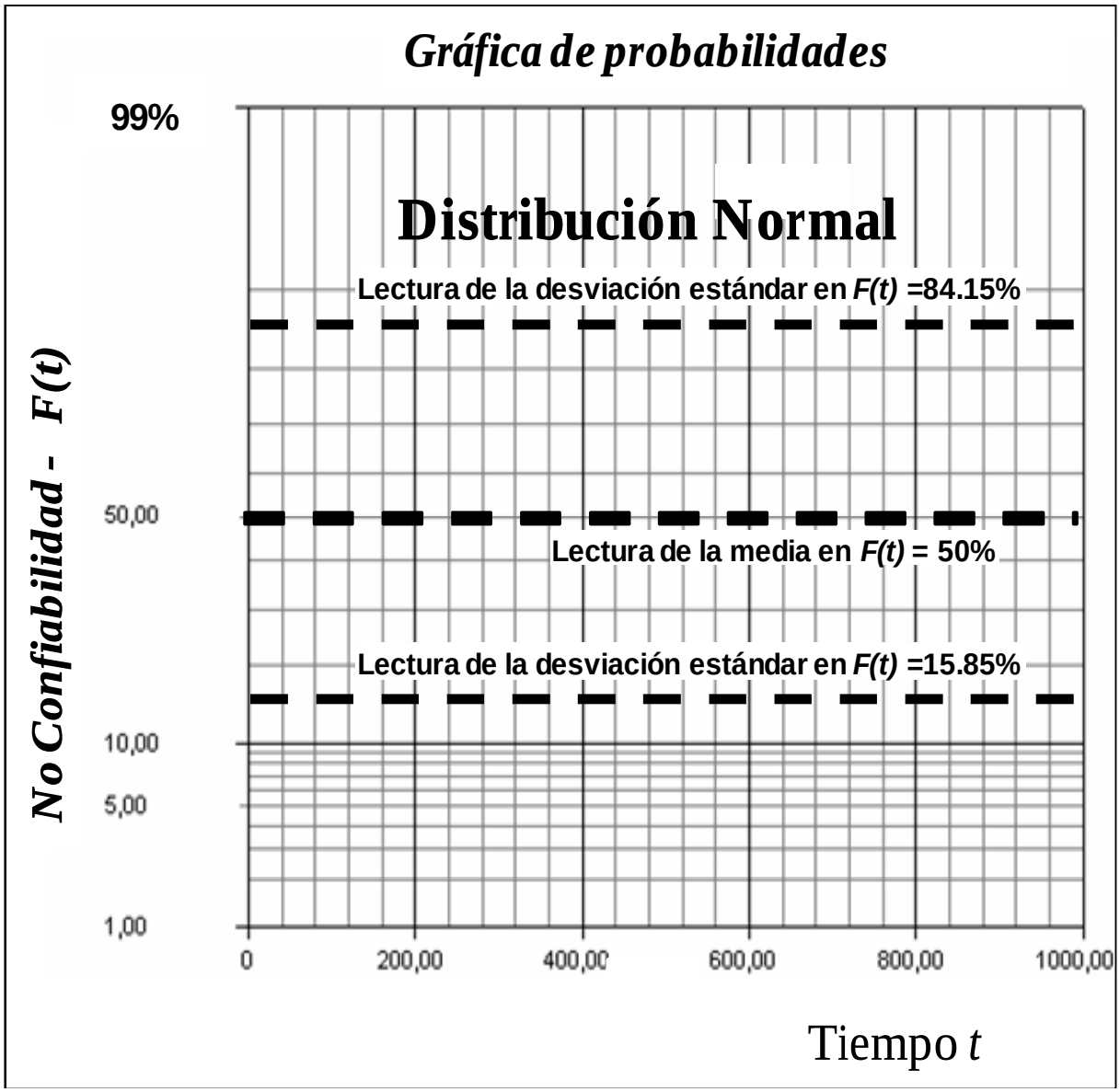
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Existen distintos métodos gráficos para otras funciones como LogNormal y Normal; la metodología es muy similar a la utilizada en el gráfico de Allen Plait (Papel de Weibull).

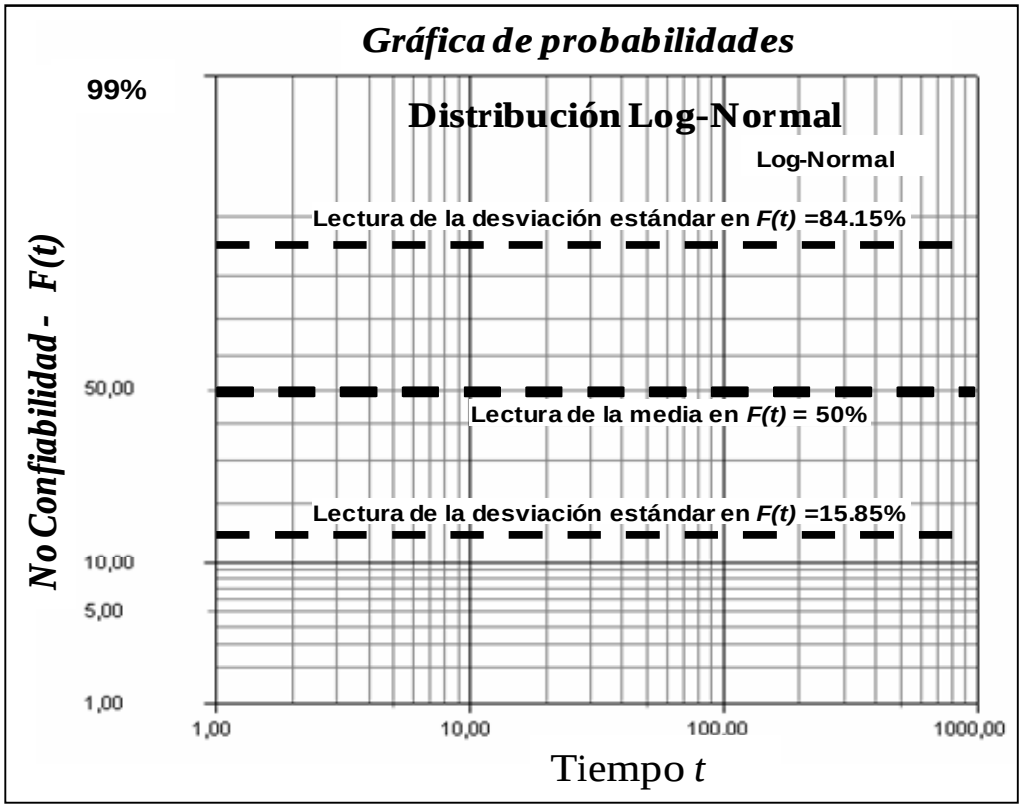
Este método adopta la Función de probabilidades de fallas acumuladas F(t) la cual trata de alinearla en forma recta, y se vale de la construcción de los ejes de coordenadas Y y X con transformaciones especiales, utilizadas en los papeles de cada función.

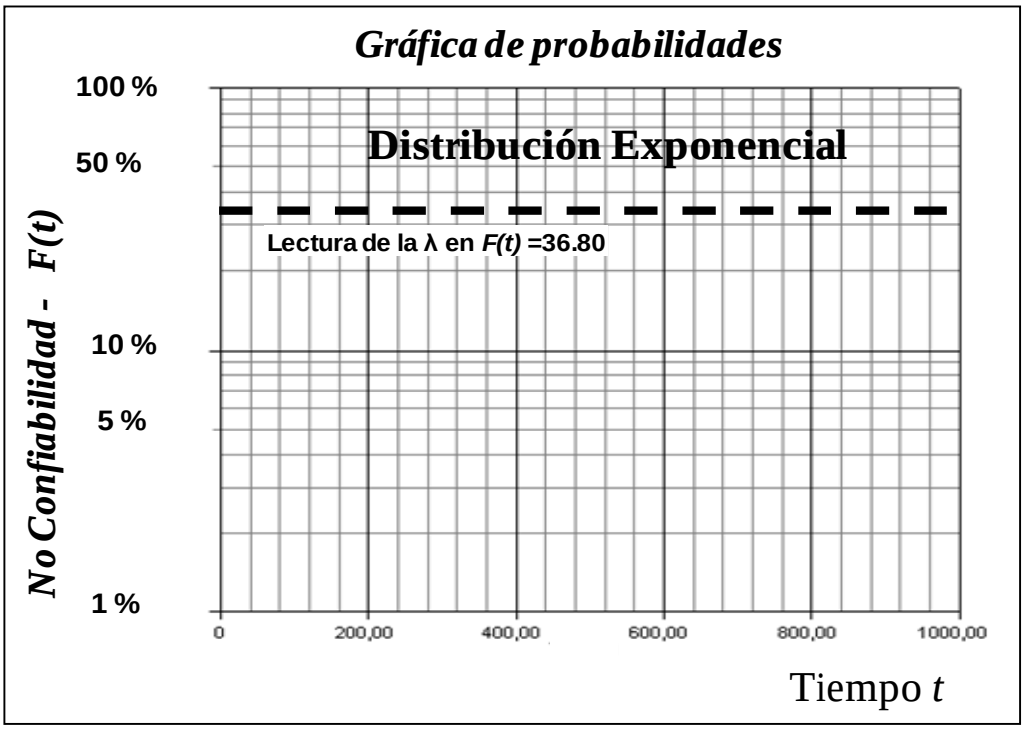
Este diseño de los ejes se basa en la alineación de la función de tiempo de falla en la abscisa (X, en este caso eje *t*) y en el eje vertical (Y) la función de no confiabilidad o de probabilidad de falla acumulada, o la de mantenibilidad cuando de esta se trate el análisis.

Ilustración 53 - Papeles de alineación para distribuciones Normal, LogNormal y Exponencial



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com





Los puntos se grafican y a partir de la mejor recta, que se pueda dibujar se obtiene la pendiente, y los parámetros necesarios se logran a partir de lecturas específicas dentro del papel.

La estimación de los parámetros de las distribuciones en este método implica el corte de la línea de ajuste en puntos específicos del eje Y y su lectura en el eje X, en los valores descritos en las figuras para cada una de las tres distribuciones.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

En general el problema que se presenta en la lectura de parámetros en los diferentes papeles de las distribuciones es que pueden brindar poca exactitud.

El análisis anterior es para cuando $t - t_0 \geq 0$, es de anotar que cabe la posibilidad de que $t - t_0 < 0$, lo que expresa que t es menor que t_0, cuando esto sucede la función de Tasa de Fallas en Weibull es cero, $l(t) = \frac{b}{h}\left(\frac{t - t_0}{h}\right)^{b-1}$, al igual que la Función de densidad de probabilidades o de Fallas instantáneas $f(t) = l(t).R(t) = \frac{b}{h}\left(\frac{t - t_0}{h}\right)^{b-1} * \exp\left[-\left(\frac{t - t_0}{h}\right)^{b}\right]$ también adquiere el valor de cero, por otro lado *R(t)* o Confiabilidad vale 1 ya que el elemento o máquina para el período entre $0 < t \leq t_o$ es intrínsecamente confiable con una muy baja probabilidad de que entre en falla, una vez t alcanza y supera el valor de t_o el elemento empieza a tener un comportamiento natural en cuanto a fallas, basado en alguna de las distribuciones enunciadas acorde a sus características específicas.

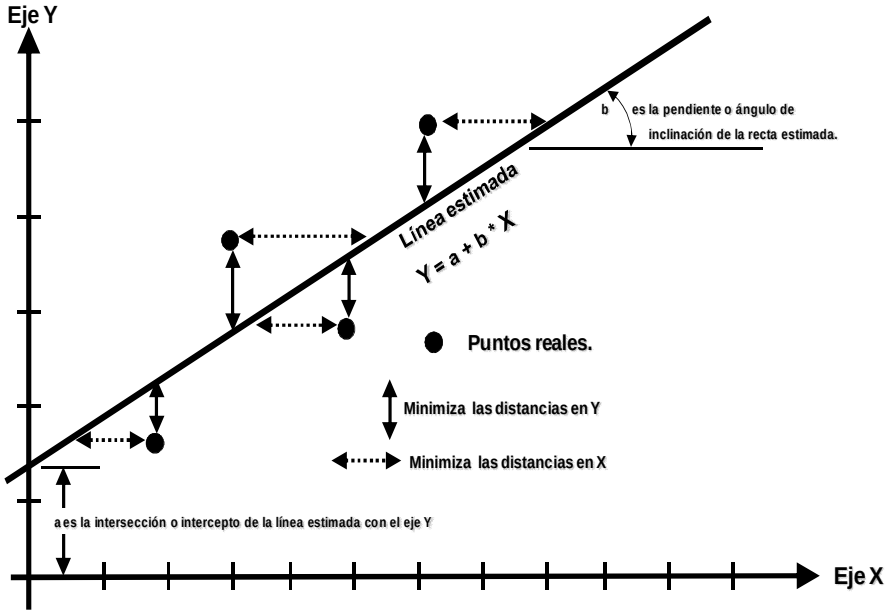
3.4 Uso del método de regresión lineal con mínimos cuadrados para alinear la función de probabilidad de Fallas (de no confiabilidad) o de mantenibilidad, para obtener parámetro.

El uso de la idea del método gráfico permite realizar para un conjunto de datos, un ajuste por medio del análisis matemático de regresión lineal con mínimos cuadrados a una línea recta, donde se trata de estimar los parámetros de la pendiente y el intercepto, que minimicen el componente aleatorio de error.

El método requiere que una línea recta se ajuste a un conjunto de datos de tal manera que la suma de los cuadrados de las distancias de los puntos a la línea de ajuste sea minimizada, tanto en el eje de las abcisas como de las ordenadas.

Esta minimización se desarrolla tanto en el eje vertical como en el eje horizontal (Vallejo, y otros, 2004) (Reliasoft@, 2008).

Ilustración 54 - Ajuste de una línea recta en los ejes X o Y



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ecuación 25 - Análisis de mínimos cuadrados

$$\sum_{j=1}^{N}\left(\hat{a}+\hat{b}\cdot x_i - y_i\right)^2 = \min(a,b)\sum_{j=1}^{N}\left(a+b\cdot x_i - y_i\right)^2$$, donde: a es el intercepto con el eje Y y b es la pendiente

de la recta estimada, el símbolo ^ denota valor estimado o calculado,

Y es la variable dependiente y

X es la independiente.

Con j como los diferentes valores de los puntos hasta N número total de puntos a alinear

(Reliasoft@, 2008)

Ecuación 26 - Definición matemática de la pendiente y del intercepto de la recta alineada estimada.

$$b = \frac{\sum_{j=1}^{N} X_j * Y_j \; - \; N * \overline{X} * \overline{Y}}{\sum_{j=1}^{N} X_j^{\,2} \; - \; N * \overline{X}^{\,2}}$$, b es el valor de la pendiente estimada, con X como los

diferentes valores independientes reales, y los valores dependientes reales como Y, j es cada uno de los puntos.

N el número total de puntos.
$\overline{Y}$ es la media o promedio de los Y reales originales, y $\overline{X}$ es la media o promedio de los X reales del caso.

$a = \overline{Y} - b * \overline{X}$, con a como el intercepto de la recta estimada, y con $\overline{Y}$ y $\overline{X}$ como las medias de los valores Y y X reales originales.

(Levin, 1996)

3.4.1 Criterios de calidad de la alineación

Los criterios que permiten medir la calidad de la alineación que se alcanza, son varios, entre los más relevantes, se encuentran: el ajuste, el error estándar del estimado, el coeficiente muestral de determinación r^2 y coeficiente de correlación r.

3.4.1.1 Ajuste

Califica el grado de distancias en Y tanto por encima como por debajo de la recta alineada.

Ecuación 27 - Ajuste de la recta alineada

$$Ajuste \;\; = \sum \left| Y_j \; - \; \hat{Y}_j \right| =$$

debe ser igual o tender a cero, manifiesta el centramiento de la alineación en el eje Y, muestra si se compensan las diferencias en Y por encima y por debajo de la recta, es un indicador débil de la alineación. $\hat{Y}$, son los valores estimados correspondiente a cada Y.

3.4.1.2 Error típico o Variación o Error Estándar del Estimado

Mide la confianza de la ecuación de estimación, es similar a la desviación estándar, ya que ambos son medidas de

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

dispersión. El error estándar también evalúa la variabilidad o dispersión de los puntos en Y alrededor de la recta alineada.

Ecuación 28 - Error estándar del estimado de la recta alineada

$$Error\ estándar\ del\ estimado = Confianza\ de\ la\ ecuación\ de\ estimación = S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N}(Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}}$$

, debe tender a cero o a ser el valor mínimo posible. En ella $\hat{Y}$ son los valores estimados correspondientes calculados con la nueva ecuación Y = a + b*X para cada uno de los Y reales originales.

(Levin, 1996)

3.4.1.3 Coeficiente de Determinación Muestral r^2 y Ajustado

Evalúa la fuerza, extensión o grado de asociación que existe entre los puntos correspondientes de las dos variables Y y X. Debe acercarse a uno (1) y se permite como aceptable entre un rango de 0.9025 y 1.0000.

Ecuación 29 - Coeficiente de determinación muestral r^2 de la recta alineada

$$\text{Coeficiente de Determinación Muestral} = r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N}(Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N}(Y_j - \overline{Y}_j)^2}$$

$\hat{Y}$, son los valores estimados correspondiente a cada Y; $\overline{Y}$ es el valor medio de las Y.

(Levin, 1996)

Últimamente se usa también otra prueba más fuerte en los procesos de alineación, se denomina Coeficiente de Determinación Muestral Ajustado, se estima mediante la expresión:

Ecuación 30 - Coeficiente de determinación muestral r^2 ajustado de la recta alineada

$$\text{Coeficiente de Determinación Muestral Ajustado} = r^2\ Ajustado = 1 - \frac{\left\{\sum_{j=1}^{N}(Y_j - \hat{Y}_j)^2\right\} * (N-1)}{\left\{\sum_{j=1}^{N}(Y_j - \overline{Y}_j)^2\right\} * (N-i)},$$

donde N es el número total de eventos, j el evento en particular e i el número de variables correlacionadas, en el caso particular de alineación de *F(t)* o de *M(t)* son dos variables, i = 2.

Los valores de r^2 ajustado deben estar entre 0.90 y 1.000.

3.4.1.4 Coeficiente de Correlación

Es una medida que evalúa lo bien que el modelo se ajusta en la regresión lineal, e indica la correlación existente entre los datos y el estimador de no confiabilidad o de mantenibilidad, denota el valor de la correlación y el signo informa sobre el sentido inverso o directo de la correlación entre la variables Y y X.

Los valores cercanos a uno o menos uno, presentan una alta correlación, en tanto que los valores cercanos a cero no tienen ninguna correlación con el modelo lineal. Se considera aceptable cuando se está entre 0.95 y 1.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ecuación 31 - Definición matemática del coeficiente de correlación múltiple

$$Coeficiente\ de\ Correlación\ Múltiple = r = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(X_j - \overline{X}\right) * \left(Y_j - \overline{Y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(X_j - \overline{X}\right)^2 * \sum_{j=1}^{N}\left(Y_j - \overline{Y}\right)^2}}$$

, donde r es el coeficiente de correlación, Y y X son los valores reales iniciales, $\overline{Y}$ y $\overline{X}$ son las medias o promedios de los valores reales originales de *t* y *F(t)* o de *M(t).*

(Reliasoft@, 2008)

El método de mínimos cuadrados es bastante bueno para las distribuciones que se dejan alinear; afortunadamente, la mayoría de las distribuciones usadas en el análisis de fallas son de este tipo. Para estas distribuciones los cálculos son relativamente sencillos y poseen una buena bondad de ajuste a través del factor de correlación (Reliasoft@, 2008).

3.5 Transformaciones en Weibull, LogNormal y Normal para obtener parámetros por regresión

Los valores de los datos de falla del eje X y los valores de los estimados de la no confiabilidad (o mantenibilidad) en el eje Y, requieren transformaciones para obtener la alineación de la función de distribución deseada.

3.5.1 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull responde a los parámetros b y h; que representan respectivamente el factor de forma y de escala de la distribución; la obtención de estos parámetros se logra por medio de la alineación de la distribución de Weibull mediante las transformaciones necesarias, luego de la obtención de la pendiente y el intercepto de la recta se calculan los parámetros b y h de la distribución (Reliasoft@, 2008).

Ecuación 32 - Transformación en Weibull para los valores Y y X

$$Y_j = Ln\left[Ln\left(\frac{1}{1 - F(t_j)}\right)\right]$$

, para el caso de no confiabilidad $F(t_j)$.

$$X_j = Ln\left(t_j\right)$$

y

$$Y_j = Ln\left[Ln\left(\frac{1}{1 - M(t_j)}\right)\right]$$

, para el caso de Mantenibilidad *M(t)* con

$$X_j = Ln\left(t_j\right)$$

Los valores t_i (tiempos de falla o de reparación), $F(t_i)$ y $M(t_i)$ son los que se obtienen por el método de estimación i-kaésimo o por cualquiera de los dos métodos de rango de mediana (Tabla o Benard), recuérdese que no se recomienda Kaplan-Meier (ya expuesto anteriormente); para cada uno de los puntos de *UT* o *DT*, en la correspondiente disponibilidad a utilizar.

Los valores de la pendiente b y de la intersección a de la recta alineada permiten estimar los parámetros de escala Eta η y forma βeta, mediante las siguientes expresiones:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$Parámetro\ de\ Escala\ \ Eta\ \ h = e^{\left[-\frac{a}{beta}\right]} = e^{\left[-\frac{Intersección}{Pendiente}\right]}$$

$$Parámetro\ \ de\ Forma\ \ beta = b = b = \text{Pendiente}\ \ \text{estimada}\ \ \text{de la recta}\ \ \text{Alineada}$$

(Reliasoft@, 2008)

3.5.1.1 Parámetros de vida útil y de reparaciones en Weibull

La vida útil o Tiempo Medio entre Fallas *MTBF* se puede estimar a partir de:

Ecuación 33 - MTBF Weibull.

$Esperanza(TBF) = MTBF = \int_0^{\infty} R(t)\,dt = \int (1 - F(t)) * dt$, donde *MTBF* Tiempo Medio entre Fallas (Rojas, 1975), *R(t)* es la función de confiabilidad y *F(t)* es la función de no confiabilidad

$MTBF = h * Función Gamma(1 + \frac{1}{1 + beta})$, donde Eta η parámetro de escala y βeta es el de forma, con función Gamma para la estimación.

(Kececioglu, 1995)

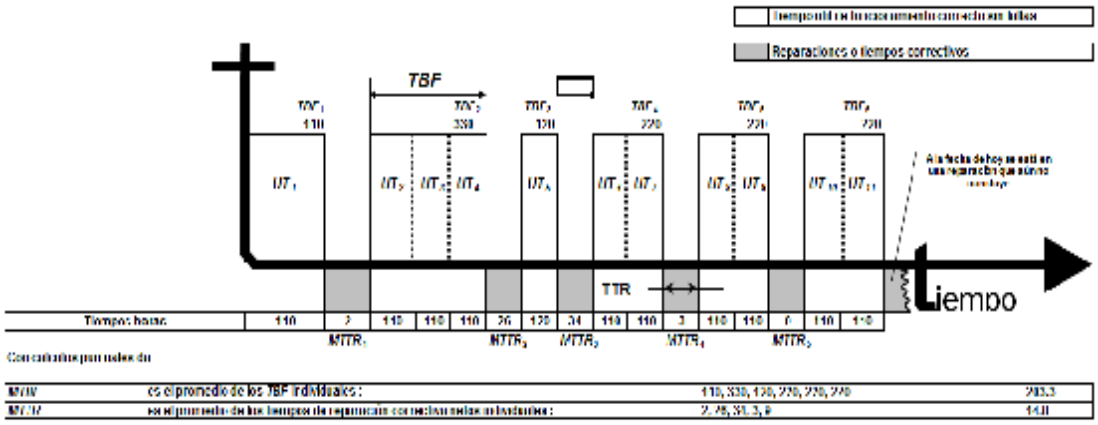
Ecuación 34 - MTTR Weibull

$Esperanza(TTR) = MTTR = \int_0^{\infty} M(t)\,dt$, donde M, donde *MTTR* Tiempo Medio de Reparaciones con *M(t)* como función de Mantenibilidad. Además $MTTR = h * Función Gamma(1 + \frac{1}{1 + beta})$, donde Eta η parámetro de escala y βeta es el de forma, con función Gamma para la estimación.

La estimación de un parámetro adicional en la distribución de Weibull, el de posición, se debe realizar mediante métodos iterativos, reemplazando el tiempo t, por un tiempo (t-t_0); el parámetro de posición se usa para desplazar la distribución en una u otra dirección; define la localización del origen de la distribución y puede ser tanto positivo como negativo (NS@, 2005).

Ejemplo 19 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de Weibull para A_I

Con el mismo ejemplo que se trae a través del proceso se realizan los cálculos así:



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Transformaciones

Weibull - No confiabilidad

No Confiabilidad

Pruebas y cálculos de regresión

	j	t_j	$F(t_j)$	Ln(Ln(1/(1-F(t)))) - Y de la regresion	Ln de datos - X de la regresion	$X_j * Y_j$	X_j^2	$\hat{Y}_j$	$\lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert$	$\lvert X_j - \overline{X} \rvert$	$[X_j - \overline{X}]^2$	$(X_j - X)*(Y_j - \overline{Y})$	$\lvert Y_j - \overline{Y} \rvert$	$[Y_j - \overline{Y}]^2$	$[Y_j - \hat{Y}_j]^2$
	1	110	14.29%	-1.86982	4.700	-8.7891	22.0945	-1.5368	-0.3331	-0.4697	0.2206	0.6354	-1.3528	1.8301	0.1109
	2	120	28.57%	-1.08924	4.787	-5.2147	22.9201	-1.3479	0.2586	-0.3827	0.1464	0.2190	-0.5722	0.3275	0.0669
	3	220	71.43%	0.22535	5.394	1.2155	29.0912	-0.0318	0.2572	0.2235	0.0499	0.1659	0.7423	0.5511	0.0661
N =	4	330	85.71%	0.66573	5.799	3.8606	33.6295	0.8485	-0.1828	0.6289	0.3955	0.7438	1.1827	1.3988	0.0334
					Suma	-8.9277	107.7353	-2.0680	0.0000	0.0000	0.8125	1.7641	0.0000	4.1075	0.2774

Se vuelven 4 valores al haber 3 repetidos en 220

$\overline{Y}$ -0.51700 $\overline{X}$ 5.170

Pendiente $b = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} X_j * Y_j - N * \overline{X} * \overline{Y}}{\sum_{j=1}^{N} X_j^2 - N * \overline{X}^2} =$ 2.1712

Intercepto $a = \overline{Y} - b * \overline{X} =$ -11.7422

$Ajuste = \sum \lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert =$ 0.0000 Ajuste

$S_e = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} =$ 0.3724 Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico

$r^2 = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y_j})^2}$ 0.9325 Coeficiente de Determinación Muestral

$r = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X}) * (Y_j - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y})^2}} =$ 0.9656 Coeficiente de Correlación Múltiple

Weibull - Mantenibilidad

Pruebas y cálculos de regresión

	j	t_j	$M(t_j)$	Ln(Ln(1/(1-M(t)))) - Y de la regresion	Ln de datos - X de la regresion	$X_j * Y_i$	X_j^2	$\hat{Y}_j$	$\lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert$	$(X_j - \overline{X})$	$[X_j - \overline{X}]^2$	$(X_j - X)*(Y_j - \overline{Y})$	$\lvert Y_j - \overline{Y} \rvert$	$[Y_j - \overline{Y}]^2$	$[Y_j - \hat{Y}_j]^2$
	1	2	16.67%	-1.70198	0.693	-1.1797	0.4805	-1.4548	-0.2472	-1.4615	2.1361	1.7319	-1.1850	1.4042	0.0611
	2	3	33.33%	-0.90272	1.099	-0.9917	1.2069	-1.1785	0.2758	-1.0561	1.1153	0.4074	-0.3857	0.1488	0.0761
	3	9	50.00%	-0.36651	2.197	-0.8053	4.8278	-0.4298	0.0633	0.0425	0.0018	0.0064	0.1505	0.0226	0.0040
	4	26	66.67%	0.09405	3.258	0.3064	10.6152	0.2932	-0.1991	1.1034	1.2175	0.6742	0.6110	0.3734	0.0397
N =	5	34	83.33%	0.58320	3.526	2.0566	12.4352	0.4760	0.1072	1.3717	1.8815	1.5091	1.1002	1.2104	0.0115
					Suma	-0.6138	29.5656	-2.2940	0.0000	0.0000	6.3522	4.3290	0.2910	3.1594	0.1923

$\overline{Y}$ -0.45879 $\overline{X}$ 2.155

$b = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} X_j * Y_j - N * \overline{X} * \overline{Y}}{\sum_{j=1}^{N} X_j^2 - N * \overline{X}^2} =$ 0.6815

$a = \overline{Y} - b * \overline{X} =$ -1.9272

$Ajuste = \sum \lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert =$ 0.0000 Ajuste

$S_e = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} =$ 0.2532 Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico

$r^2 = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y_j})^2}$ 0.9391 Coeficiente de Determinación Muestral

$r = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X}) * (Y_j - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y})^2}} =$ 0.9663 Coeficiente de Correlación Múltiple

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Método i-kaésimo

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	F(t) = j / N + 1
1	110	14.29%
2	120	28.57%
3	220	42.86%
4	220	57.14%
5	220	71.43%
6	330	85.71%
	Media	50.00%

No. Dato j	Datos de reparación en horas	M(t) = j / N + 1
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
	Media	50.00%

Método i-kaésimo con no repetición de UT

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	F(t) = j / N + 1
1	110	14.29%
2	120	28.57%
5	220	71.43%
6	330	85.71%
	Media	50.00%

No. Dato j	Datos de reparación en horas	M(t) = j / N + 1
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
	Media	50.00%

No Confiabilidad

Ln(Ln(1/(1-*F(t)*))) - Y de la regresion	Ln de datos - X de la regresion
-1.86982	4.700
-1.08924	4.787
0.22535	5.394
0.66573	5.799

Mantenibilidad

Ln(Ln(1/(1-*M(t)*))) - Y de la regresion	Ln de datos - X de la regresion
-1.70198	0.693
-0.90272	1.099
-0.36651	2.197
0.09405	3.258
0.58320	3.526

Cálculos con método de regresión en excel

Intersección	-11.742
βeta	2.171
Eta *η*	223.25
MTBF	**197.711**

MTBF **= h * Gamma G (1+ 1/b)**

MTBF **puntual**	**203.300**

Intersección	-1.8708
βeta	0.6355
Eta *η*	18.98
MTTR	**26.61**

MTTR **= h * Gamma G (1+ 1/b)**

MTTR **puntual**	**14.800**

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Weibull - Estimación de Parámetros

No Confiabilidad

Escala	*Parámetro de Escala* – η – e [– a / β na] – e [hora sin dato / Pendiente]	**223.25**
Forma	*Parámetro de Forma* β eta = b = *Pendiente estimada de la recta alineada* .	**2.1712**
MTBF =	η * Gamma Γ (1+ 1/β) =	**197.71**

Mantenibilidad

Escala	*Parámetro de Escala* – η – e [– a / β na] – e [– hora sin dato / Pendiente]	**16.91**
Forma	*Parámetro de Forma* β eta – b – *Pendiente estimada de la recta alineada* .	**0.6815**
MTTR =	η * Gamma Γ (1+ 1/β) =	**21.975**

Cálculos con método de regresión en excel

Intersección	-11.742		Intersección	-1.9272
βeta	2.171		βeta	0.6815
Eta η	223.25		Eta η	16.91
MTBF	197.711		***MTTR***	21.97
MTBF = η * Gamma Γ (1+ 1/β)			MTTR = η * Gamma Γ (1+ 1/β)	
MTBF puntual	203.300		***MTTR*** puntual	14.800

Lectura de Allen - Plait o papel Weibull

βeta	2.070		βeta	0.7000
Eta η	230.00		Eta η	17.00
MTBF	203.734		***MTTR***	21.52

(Mora, 2007b)

Se observa que el *MTBF* del cálculo puntual 203.3 es superior al estimado con distribución normal de 197.71 horas, al igual en el *MTTR* calculado con estimación puntual que da 14.8 horas es diferente al estimado con alineación y luego con distribución Weibull con un valor medio esperado en reparación de 21.97 horas.

En general es más preciso[163] trabajar con distribuciones ya que existe un solo valor de βeta y Eta para un mismo valor de MTBF al igual ocurre con el MTTR, en el caso particular el βeta obtenido en confiabilidad ubica el equipo del ejemplo en la Fase III de envejecimiento de Weibull, la cual se debe verificar con la distribución Normal.

Los valores obtenidos en la alineación para no confiabilidad en distribución Weibull están dentro de lo permisible pues su coeficiente de determinación muestral r^2 es de 0.9325 (debe estar entre 0.9025 y 1.00) y coeficiente de correlación r es de 0.9656 (debe ser entre 0.95 y 1.00); en el caso de la mantenibilidad el coeficiente de determinación muestral r^2 con valor de 0.9391 y el coeficiente de correlación r de 0.9663, cumplen con lo requerido.

[163] *Recuérdese que existen varias curvas con diferentes βetas y Etas η, que tienen los mismos MTBF o MTTR (véase Ejemplo 8 - Varias curvas de confiabilidad diferentes para el mismo MTBF y Ejemplo 9 - Varias curvas de mantenibilidad diferentes, para el mismo MTTR.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3.5.2 Distribución Normal

Es una distribución discreta que se presenta con frecuencia cuando la vida útil de los componentes se ve afectada desde un comienzo por el desgaste, sirve para describir muy bien los fenómenos de envejecimiento de equipos, modelos de fatiga y fenómenos naturales. En ésta distribución las fallas tienden a distribuirse de una forma simétrica alrededor de la vida media (Díaz, 1992)(Modarres, 1993)(Ramakumar, 1996)(Ebeling, 2005)(O´Connor, 2002)(Gnedenko, y otros, 1999)(Lewis, 1995).

Dado que la vida de un componente cualquiera no puede tener valores negativos, ésta distribución debe modificarse ligeramente para servir de distribución de fallas. Para ello se trunca el recorrido de *t*, limitándolo al intervalo (0,+∞) en lugar de (-∞,+∞), esto implica el uso de un factor de normalización, que aparece en la definición de la distribución normal truncada (Rojas, 1975).

La distribución normal, también conocida como la distribución de Gauss o Laplace, es desarrollada por varios matemáticos, entre ellos Abraham de Moivre y Karl Gauss, en el siglo XVIII; se usa bastante en todos los campos de experimentación y sus valores están tabulados en tablas (Levin, 1996).

El proceso propuesto en la Ilustración 29 - Modelo universal e integral, propuesto para la medición CMD - indica que es recomendable usar la estimación de parámetros mediante la distribución normal cuando la prueba de bondad de ajuste para la distribución Weibull no es adecuada y el valor estimado de no confiabilidad βeta es superior a 2.05, de tal manera que se usa como segunda opción en la estimación.

La distribución normal responde a los parámetros μ y σ, que representan la media y la desviación estándar de la distribución respectivamente; los cuales se estiman a partir de los valores de pendiente e intercepto con el eje Y obtenidos de la recta alineada de la distribución normal mediante el uso de transformaciones, así:

Ecuación 35 - Transformación en Normal para los valores Y y X.

Para no confiabilidad

$$\begin{aligned} Y_j &= f^{-1}\left[F(t_j)\right] \\ X_j &= t_j \end{aligned}$$

, donde f^{-1} es el inverso de la distribución normal estándar, $F(t_j)$ es el estimado de la no confiabilidad y t_j es el tiempo de falla.

Para Mantenibilidad

$$\begin{aligned} Y_j &= f^{-1}\left[M(t_j)\right] \\ X_j &= t_j \end{aligned}$$

, con $M(t_j)$ como el estimado de la mantenibilidad y tj el tiempo de reparación.

Los parámetros de la distribución normal, se calculan así:

$$Desviación\ Estándar = s = \frac{1}{b} = \frac{1}{Pendiente\ \ de\ \ la\ recta\ alineada}$$

$Media = m = -a * s = -Intercepto * Desviación\ Estándar$, con a como intercepto y b pendiente de la recta obtenida de la alineación.

(Reliasoft@, 2008) (Vallejo, y otros, 2004)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3.5.2.1 Parámetros de vida útil y de reparaciones en Normal

La vida útil o Tiempo Medio entre Fallas *MTBF* se puede estimar a partir de:

Ecuación 36 - MTBF Normal.

$$Esperanza(TBF) = MTBF = \int_0^{\infty} R(t)\,dt = \int (1 - F(t))*dt$$

, donde *MTBF* Tiempo Medio entre Fallas (Rojas, 1975), *R(t)* es la función de confiabilidad y *F(t)* es la función de no confiabilidad; con confiabilidad

$$R(t_j) = \int_t^{\infty} \frac{1}{s\sqrt{2p}} \exp\left[-\frac{(t_j - m)^2}{2s^2}\right] dt$$

, donde $R(t_j)$ es la función de confiabilidad con su media μ y su desviación estándar σ. Con

$$MTBF = m = -a*s = -Intercepto * Desviación\ Estándar$$

(Knezevic, 1996) (O´Connor, 2002)

Ecuación 37 - MTTR Normal

$$Esperanza(TTR) = MTTR = \int_0^{\infty} M(t)\,dt$$

, donde M, donde MTTR Tiempo Medio de Reparaciones con *M(t)* como función de Mantenibilidad, expresada como

$$M(t_j) = \int_t^{\infty} \frac{1}{s\sqrt{2p}} \exp\left[-\frac{(t_j - m)^2}{2s^2}\right] dt$$

$$MTTR = m = -a*s = -Intercepto * Desviación Estándar = -a*\frac{1}{b}$$

con media μ y desviación estándar σ de mantenibilidad. Los valores a y b son el intercepto y la pendiente de la recta alineada.

(Gnedenko, y otros, 1999)

Ecuación 38 - Funciones de densidad de probabilidad de fallas y de Tasa de Fallas en Normal

$$f(t_j) = \frac{1}{s\sqrt{2p}} \exp\left[-\frac{(t_j - m)^2}{2s^2}\right]$$

, f (t_i) es la función de densidad de probabilidad de fallas y donde

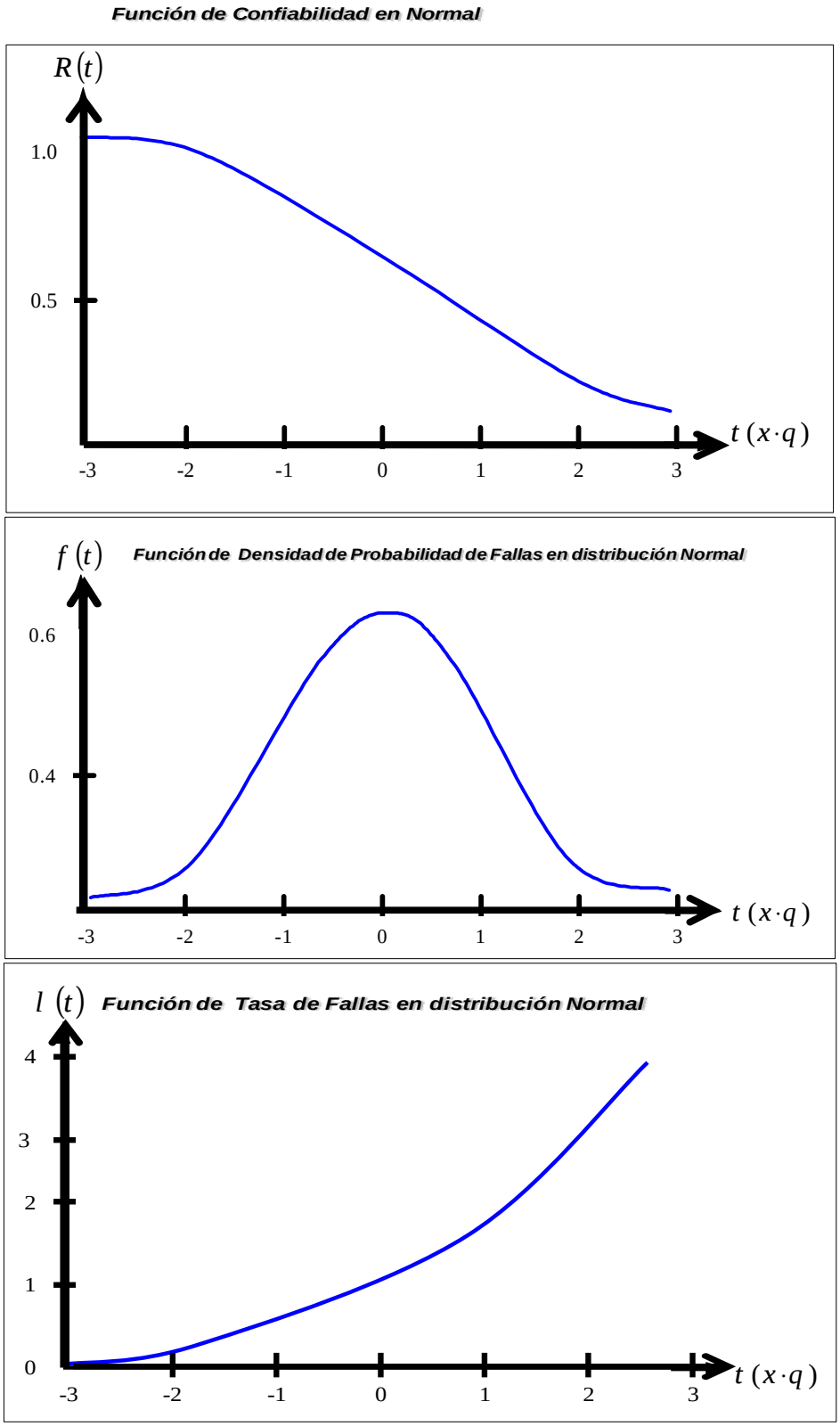
$$l(t_j) = \frac{f(t_j)}{R(t_j)}$$

es la función de Tasa de Fallas en la distribución Normal, con μ y σ ya conocidos.

(O´Connor, 2002)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 55 - Funciones de Confiabilidad, de Densidad de probabilidad de Fallas y de Tasa de Fallas de la distribución Normal.



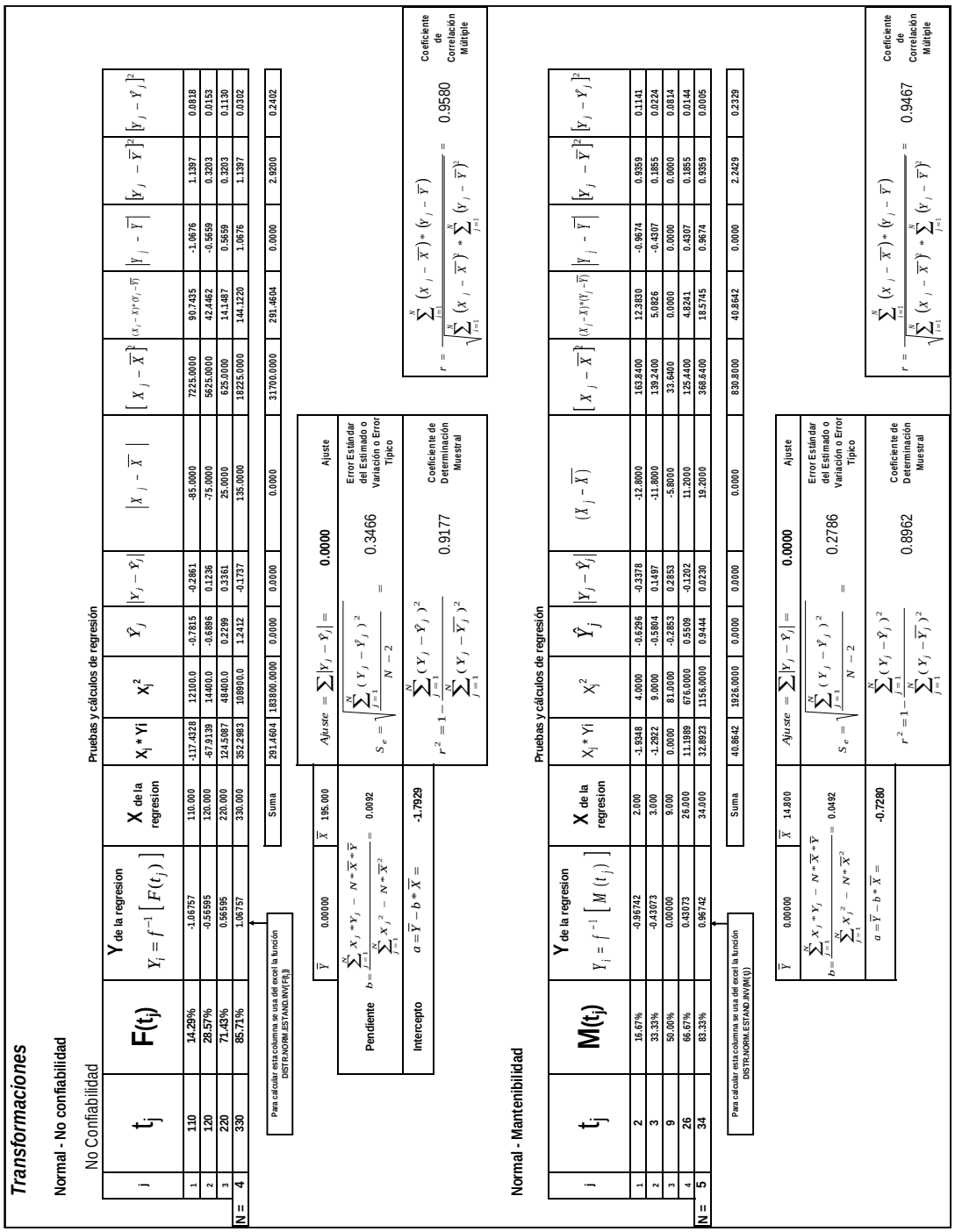
Es importante recordar que la función de densidad de probabilidad de fallas es similar en la

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

distribución Normal y en la fase final (derecha) de la distribución Weibull, cuando en esta el βeta[164] es superior a 2.05 en la Etapa 3 de la Fase III de la Ilustración 42 - Curva de la bañera o de Davies - . También hay similitud en las dos distribuciones en la Tasa de Fallas, que en ambas es creciente.

A continuación se presenta el mismo ejemplo de disponibilidad inherente que se trae, pero con distribución Normal.

Ejemplo 20 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de distribución Normal para A_I



Transformaciones

Normal - No confiabilidad

No Confiabilidad

j	t_j	$F(t_j)$	Y de la regresion $Y_i = f^{-1}[F(t_j)]$	X de la regresion	$X_i * Y_i$	X_i^2	$\hat{Y}_j$	$\lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert$	$\lvert X_j - \overline{X} \rvert$	$[X_j - \overline{X}]^2$	$(X_j - \overline{X})*(Y_j - \overline{Y})$	$\lvert Y_j - \overline{Y} \rvert$	$[Y_j - \overline{Y}]^2$	$[Y_j - \hat{Y}_j]^2$
1	110	14.29%	-1.06757	110.000	-117.4328	12100.0	-0.7815	-0.2861	-85.0000	7225.0000	90.7435	-1.0676	1.1397	0.0818
2	120	28.57%	-0.55595	120.000	-67.9139	14400.0	-0.6896	0.1236	-75.0000	5625.0000	42.4462	-0.5659	0.3203	0.0153
3	220	71.43%	0.55595	220.000	124.5087	48400.0	0.2299	0.3361	25.0000	625.0000	14.1487	0.5659	0.3203	0.1130
N = 4	330	85.71%	1.06757	330.000	352.2883	108900.0	1.2412	-0.1737	135.0000	18225.0000	144.1220	1.0676	1.1397	0.0302
				Suma	291.4604	183800.0000	0.0000	0.0000	0.0000	31700.0000	291.4604	0.0000	2.9200	0.2402

Para calcular esta columna se usa del excel la función DISTR.NORM.ESTAND.INV(F(tj))

Pruebas y cálculos de regresión

$\overline{Y}$ 0.00000 $\overline{X}$ 195.000

Pendiente $b = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} X_j * Y_j - N * \overline{X} * \overline{Y}}{\sum_{j=1}^{N} X_j^2 - N * \overline{X}^2} = 0.0092$

Intercepto $a = \overline{Y} - b * \overline{X} = -1.7929$

$Ajuste = \sum \lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert = 0.0000$ Ajuste

$S_e = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} = 0.3466$ Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico

$r^2 = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y}_j)^2} = 0.9177$ Coeficiente de Determinación Muestral

$r = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X}) * (Y_j - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y})^2}} = 0.9580$ Coeficiente de Correlación Múltiple

Normal - Mantenibilidad

j	t_j	$M(t_j)$	Y de la regresion $Y_i = f^{-1}[M(t_j)]$	X de la regresion	$X_i * Y_i$	X_i^2	$\hat{Y}_j$	$\lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert$	$(X_j - \overline{X})$	$[X_j - \overline{X}]^2$	$(X_j - \overline{X})*(Y_j - \overline{Y})$	$\lvert Y_j - \overline{Y} \rvert$	$[Y_j - \overline{Y}]^2$	$[Y_j - \hat{Y}_j]^2$
1	2	16.67%	-0.96742	2.000	-1.9348	4.0000	-0.6296	-0.3378	-12.8000	163.8400	12.3830	-0.9674	0.9359	0.1141
2	3	33.33%	-0.43073	3.000	-1.2922	9.0000	-0.5804	0.1497	-11.8000	139.2400	5.0826	-0.4307	0.1855	0.0224
3	9	50.00%	0.00000	9.000	0.0000	81.0000	-0.2853	0.2853	-5.8000	33.6400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0814
4	26	66.67%	0.43073	26.000	11.1989	676.0000	0.5509	-0.1202	11.2000	125.4400	4.8241	0.4307	0.1855	0.0144
N = 5	34	83.33%	0.96742	34.000	32.8923	1156.0000	0.9444	0.0230	19.2000	368.6400	18.5745	0.9674	0.9359	0.0005
				Suma	40.8642	1926.0000	0.0000	0.0000	0.0000	830.8000	40.8642	0.0000	2.2429	0.2329

Para calcular esta columna se usa del excel la función DISTR.NORM.ESTAND.INV(M(tj))

Pruebas y cálculos de regresión

$\overline{Y}$ 0.00000 $\overline{X}$ 14.800

$b = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} X_j * Y_j - N * \overline{X} * \overline{Y}}{\sum_{j=1}^{N} X_j^2 - N * \overline{X}^2} = 0.0492$

$a = \overline{Y} - b * \overline{X} = -0.7280$

$Ajuste = \sum \lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert = 0.0000$ Ajuste

$S_e = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} = 0.2786$ Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico

$r^2 = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y}_j)^2} = 0.8962$ Coeficiente de Determinación Muestral

$r = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X}) * (Y_j - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y})^2}} = 0.9467$ Coeficiente de Correlación Múltiple

[164] *En especial cuando el βeta en la distribución Weibull vale 3 se obtiene una distribución Normal muy pura en su Función de densidad de probabilidad de Fallas (estrictamente hablando).*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Normal - Estimación de Parámetros

No Confiabilidad

Desviación estándar s	$Desviación \quad Estándar = s = \frac{1}{b} = \frac{1}{Pendiente \quad de \quad la \quad recta \quad alineada} =$	**108.763**
Media μ	$Media = m = -a * s = -Intercepto * DesviaciónEstándar =$	**195.000**
***MTBF* =**	**μ = - a * 1 / b =**	**195.000**

a es el intercepto

Mantenibilidad

Escala	$Desviación \quad Estándar = s = \frac{1}{b} = \frac{1}{Pendiente \quad de \quad la \quad recta \quad alineada} =$	**20.3307**
Forma	$Media = m = -a * s = -Intercepto * DesviaciónEstándar =$	**14.8000**
***MTTR* =**	**μ = - a * 1 / b =**	**14.800**

a es el intercepto

***MTBF* = h * Gamma G (1+ 1/b)**

***MTBF* puntual**	**203.300**

***MTTR* = h * Gamma G (1+ 1/b)**

***MTTR* puntual**	**14.800**

Lectura de Allen - Plait o papel Weibull

βeta	**2.070**
Eta η	**230.00**
MTBF	**203.734**

βeta	**0.7000**
Eta η	**17.00**
MTTR	**21.52**

Los valores obtenidos en la alineación para no confiabilidad en distribución Normal están dentro de lo permisible, pues su coeficiente de determinación muestral r^2 es de 0.9177 y el coeficiente de correlación r es de 0.9580; en el caso de la mantenibilidad el coeficiente de determinación muestral r^2 no cumple tan bien como en el caso anterior pero se acepta con valor de 0.8962, a diferencia del coeficiente de correlación r de valor 0.9467 que sí cumple.

3.5.3 Distribución LogNormal

La distribución LogNormal se genera a partir de los parámetros m y s debido a que el logaritmo de una variable aleatoria LogNormal es una variable aleatoria normal con media μ y desviación estándar s (Barlow, 1998). La distribución, puede tomar varias formas pero siempre con tendencia o cola hacia su derecha (sesgo positivo); la razón para ser menos conocida que la distribución de Weibull, es que su función de supervivencia no tiene forma cerrada, esto es importante para la estimación de sus parámetros que siempre tienen la tendencia de ser muy altos (Ramakumar, 1996).

Los valores de m y s, no son la media y la desviación estándar de la variable aleatoria, sino de su logaritmo. Los tiempos de reparación de componentes se ajustan bien a este modelo de distribución (Ramakumar, 1996). También el estudio de mecanismos de falla revela que frecuentemente se puede observar que la fatiga de materiales sigue una distribución LogNormal (Gnedenko, y otros, 1999)(Vallejo, y otros, 2004). La distribución LogNormal sirve para representar la vida de ciertos componentes electrónicos (Nachlas, 1995).

Para distribución LogNormal se usan los parámetros m y s, que representan el logaritmo natural de la media y la desviación estándar de la variable aleatoria de la distribución. La obtención de sus parámetros se realiza por medio de la alineación de la distribución LogNormal con el uso de las transformaciones necesarias de su pendiente y su intercepto (Reliasoft@, 2008).

Ecuación 39 - Transformación en LogNormal para los valores Y y X

Para No Confiabilidad

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$Y_j = f^{-1}\left[F(t_j)\right]$$

$$X_j = Ln\,(t_j)$$

donde f^{-1} es el inverso de la distribución normal estándar, $F(t_j)$ es el estimado de la no confiabilidad y t_j es el tiempo de falla.

Para Mantenibilidad

$$Y_j = f^{-1}\left[M(t_j)\right]$$

$$X_j = Ln\,(t_j)$$

con $M(t_j)$ como el estimado de la mantenibilidad y t_j el tiempo de reparación.

Los parámetros de la distribución normal, se calculan así:

$$Desviación\ Estándar = s = \frac{1}{b} = \frac{1}{Pendiente\ de\ la\ recta\ alineada}$$

$Media = -a * s = -Intercepto * Desviación\ Estándar$, con a como intercepto y b pendiente de la recta obtenida de la alineación, la media es también el promedio de los logaritmos naturales de la variable aleatoria.

(Vallejo, y otros, 2004) (Reliasoft@, 2008)

3.5.3.1 Parámetros de vida útil y de reparaciones en LogNormal

La vida útil o Tiempo Medio entre Fallas *MTBF* se puede estimar a partir de:

Ecuación 40 - MTBF LogNormal

$$Esperanza(TBF) = MTBF = \int_0^{\infty} R(t)\,dt = \int (1 - F(t))\,*\,dt$$

donde *MTBF* Tiempo Medio entre Fallas (Rojas, 1975)

R(t) es la función de confiabilidad y *F(t)* es la función de No Confiabilidad; con confiabilidad.

$$R(t_j) = \int_t^{\infty} \frac{1}{t_j * s * \sqrt{2p}} \exp\left[-\frac{(Ln\,(t_j) - m)^2}{2s^2}\right] dt$$

, donde *R(t)* es la función de confiabilidad con su media μ y su desviación estándar σ.

$MTBF = e^{(m + \frac{s^2}{2})}$, con μ como la media de los logaritmos naturales de la variables aleatoria y σ su desviación estándar.

(Ramakumar, 1996)

Ecuación 41 - MTTR LogNormal

$Esperanza\ (TTR) = MTTR = \int_0^{\infty} M(t)\,dt$, donde M, donde *MTTR* Tiempo Medio de Reparaciones con *M(t)*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

como función de Mantenibilidad, expresada como

$$M(t_j) = \int_t^{\infty} \frac{1}{t_j * s * \sqrt{2p}} \exp\left[-\frac{(Ln(t_j)-m)^2}{2s^2}\right] dt$$

$MTTR = e^{(m + \frac{s^2}{2})}$, con media μ y desviación estándar σ de mantenibilidad.

Los valores a y b son el intercepto y la pendiente de la recta alineada.

(Gnedenko, y otros, 1999)

Ecuación 42 - Funciones de densidad de probabilidad de fallas y de Tasa de Fallas en Log Normal

$$f(t_j) = \frac{\exp\left[-\frac{(Ln(t_j)-m)^2}{2s^2}\right]}{t_j * s * \sqrt{2p}}$$

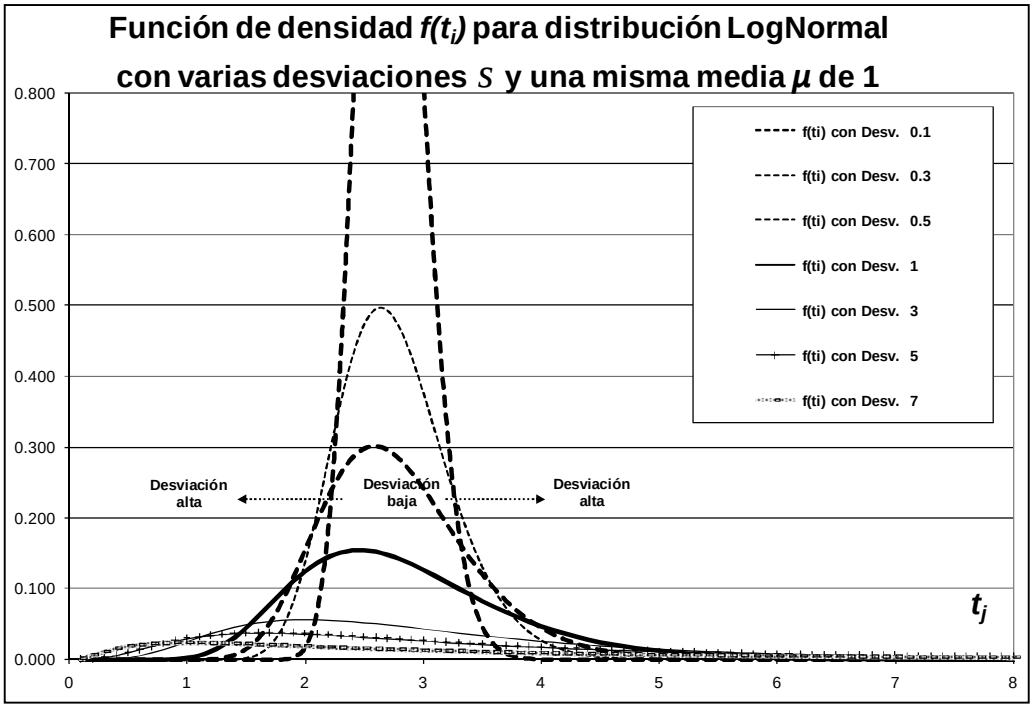
f (t_j) es la función de densidad de probabilidad de fallas y donde

$$l(t_j) = \frac{f(t_j)}{R(t_j)}$$

es la función de Tasa de Fallas en la distribución LogNormal, con μ y σ ya conocidos.

(O´Connor, 2002)

Ilustración 56 - Funciones de Confiabilidad, de Densidad de probabilidad de Fallas y de Tasa de Fallas de la distribución LogNormal



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

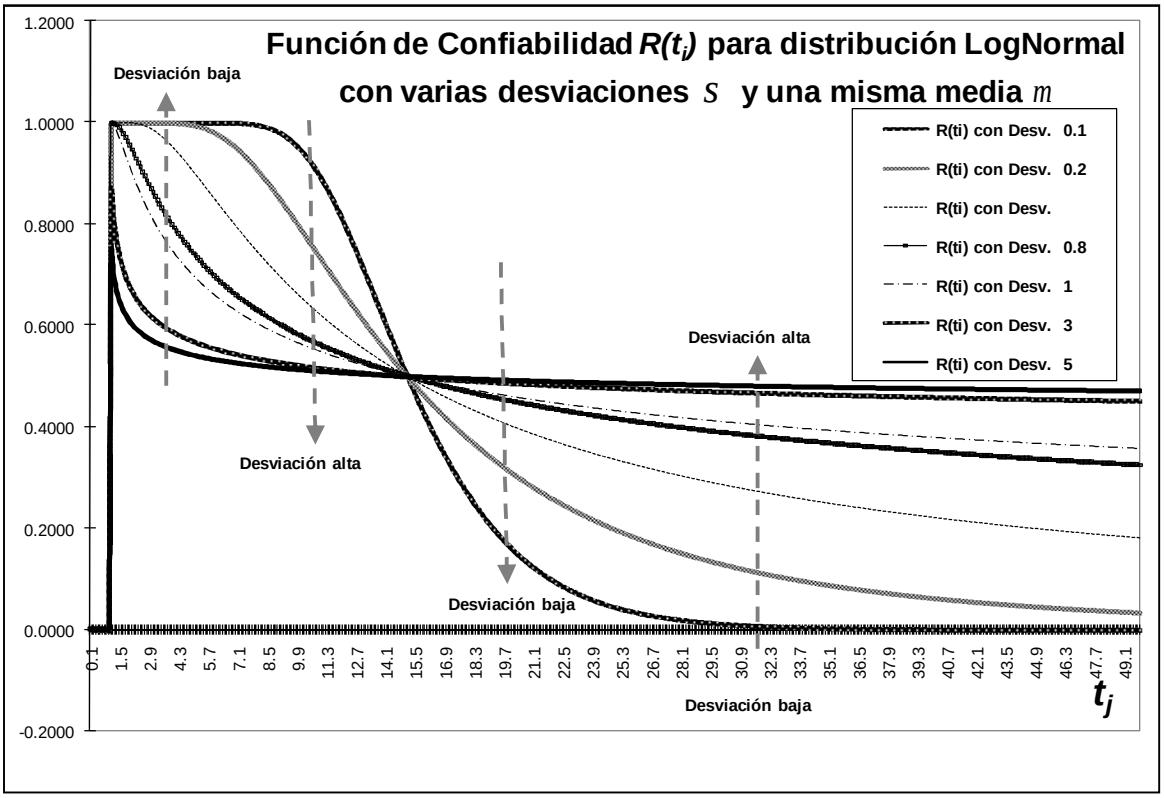
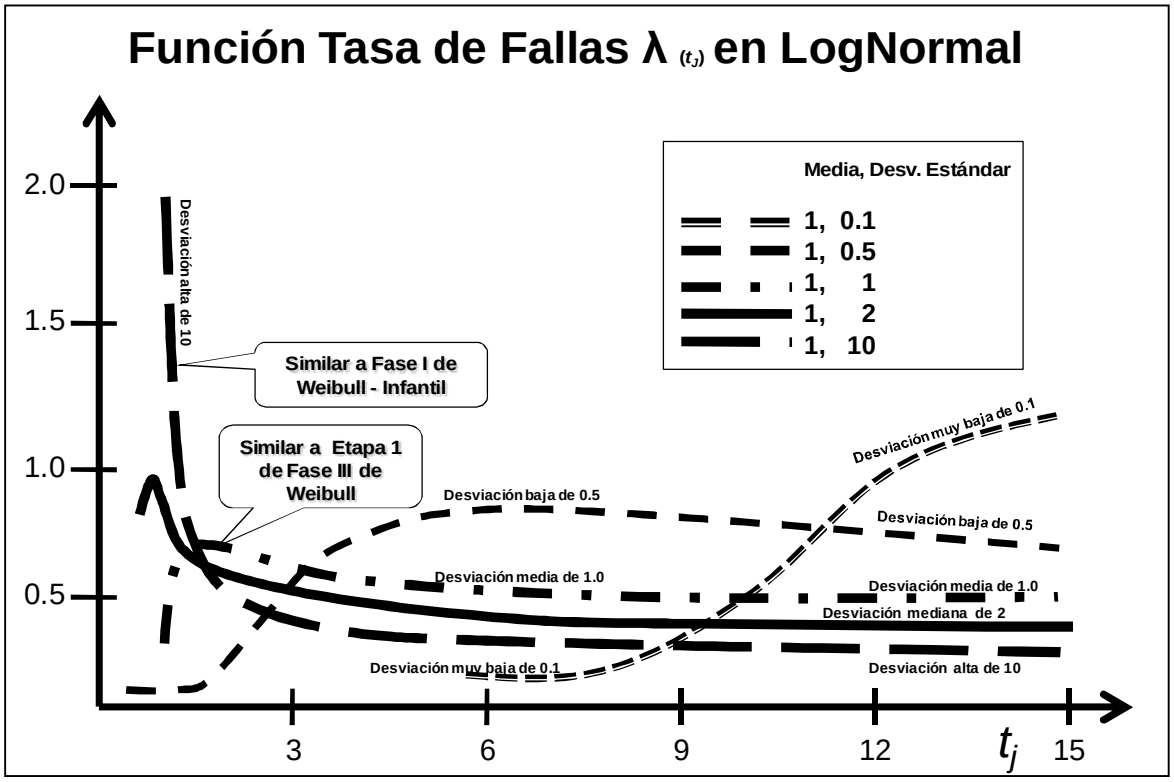


Ilustración 57 - Función Tasa de Fallas en LogNormal para diferentes valores de m y s - Hazard Function[165]



[165] *Construida a partir del software Statgraphics - Versión XV – Centurion, en las opciones - Tools – Probability Distribution – LogNormal – Gráfica Hazard Function*

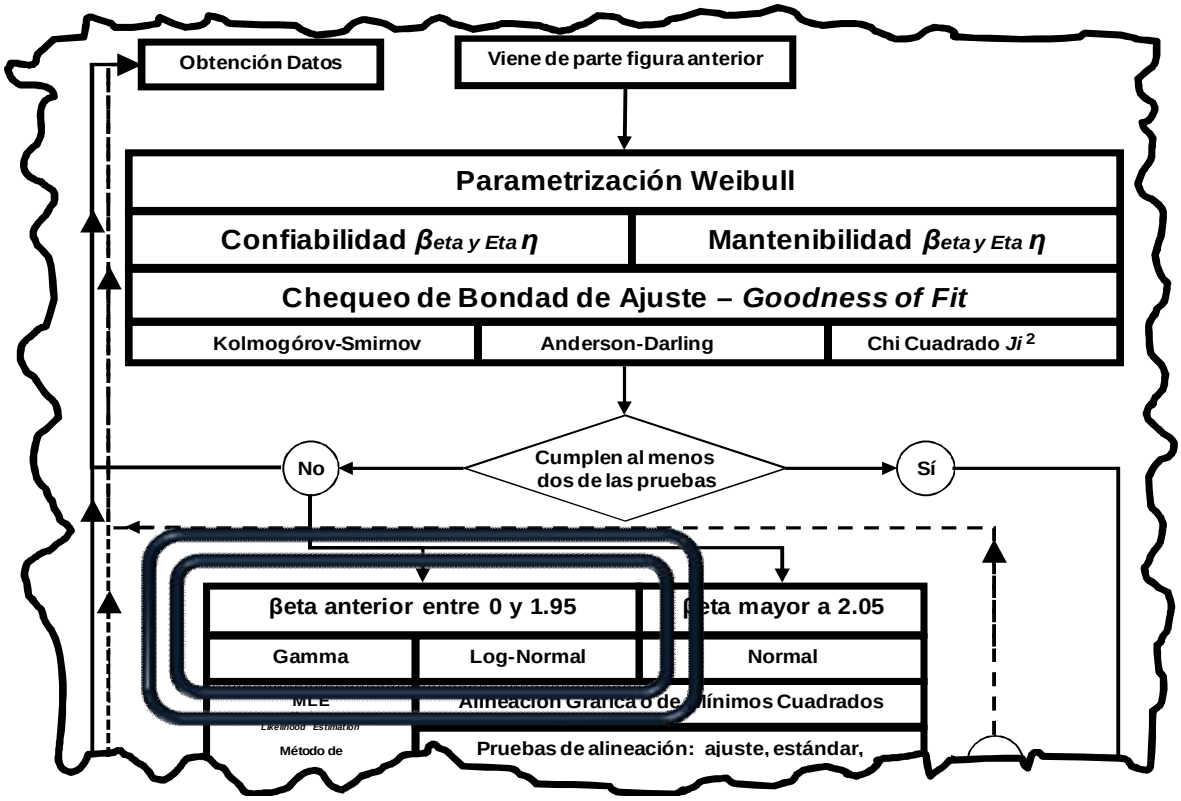
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Se observa en la función de Tasa de Fallas que LogNormal adquiere la misma forma decreciente para desviaciones bajas que la forma decreciente de la función Weibull en la Curva de la Bañera, en la Fase I de mortalidad infantil con valores de βeta entre 0.00 y 0.95; al igual obtiene la función de Tasa de Fallas en LogNormal para desviaciones medias una forma cóncava similar a la curva de la etapa 1 de la Fase III de Weibull en Ilustración 42 - Curva de la bañera o de Davies -, para valores de βeta entre 1.05 y 1.95, de tal manera que se usa LogNormal como segunda opción cuando Weibull no cumple con la bondad de ajuste en los rangos descritos de βeta.

LogNormal también sirve cuando βeta de Weibull está entre 0.95 y 1.05 con Tasa de Fallas constante, también se usa en este rango la distribución Exponencial, pero como esta es un caso particular de Gamma (Gamma-Exp@, 2005) y esta se explica más adelante, el autor recomienda solo usar LogNormal o Gamma cuando βeta de Weibull está entre 0.95 y 1.95.

Además se debe recordar que la estructura de Weibull es originalmente una exponencial, por lo tanto con esta, no se debe trabajar con Distribución Exponencial, si lo que se busca es una mejor alternativa, al ocurrir que Weibull no trabaja bien en ese caso en particular que se analiza con βeta entre 0.95 y 1.05, por lo cual para esta Zona solo se recomienda Gamma[166] o LogNormal en su defecto.

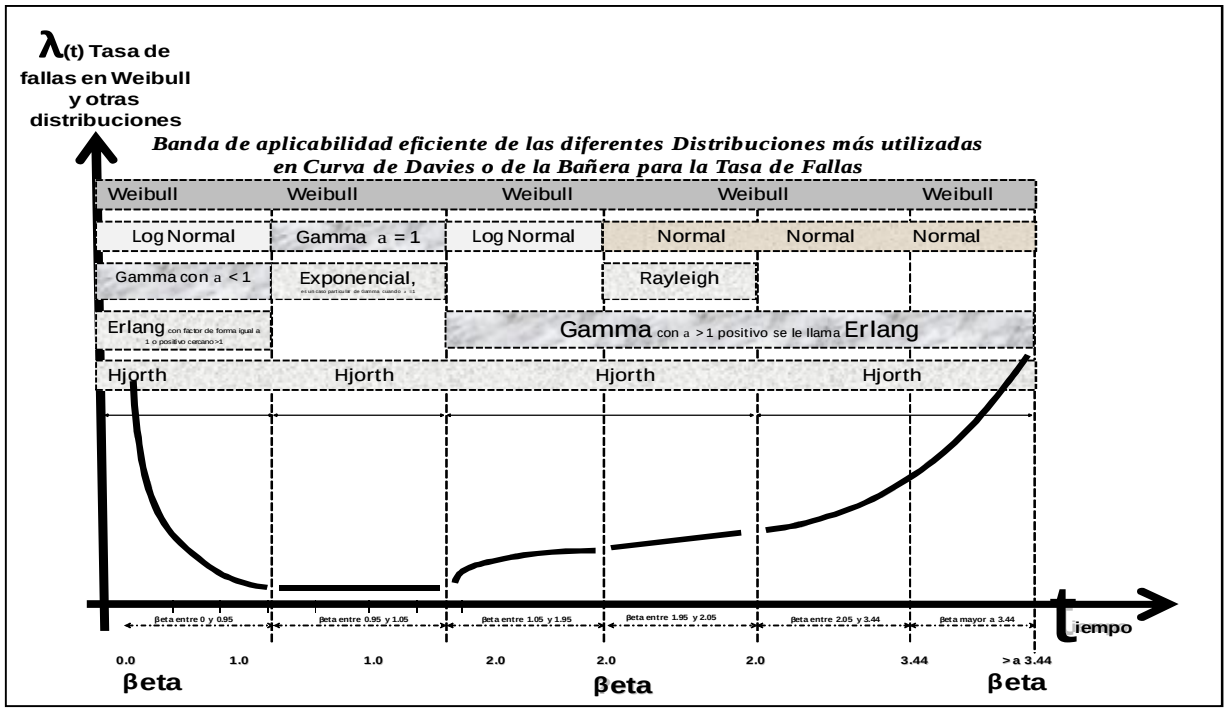
Ilustración 58 - Cuarta fase de validación de ajuste y bondad de Weibull o búsqueda de otra función



[166] *Se debe recordar que los cálculos con Gamma no requieren Alineación previa (Vallejo, y otros, 2004).*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 59 - Zonas comunes del βeta en Weibull (para cálculos de la Tasa de Fallas y otros parámetros) con otras Distribuciones



Se resuelve ahora el mismo ejercicio que se trae, pero con distribución LogNormal.

Ejemplo 21 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de distribución LogNormal para A_I

Transformaciones

LogNormal - No confiabilidad

No Confiabilidad

Pruebas y cálculos de regresión

	j	t_j	F(t_j)	Y de la regresion $Y_i = f^{-1}[F(t_j)]$	X de la regresion = Ln (t_j)	$X_j * Y_i$	X_j^2	$\hat{Y}_j$	$\lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert$	$\lvert X_j - \overline{X} \rvert$	$[X_j - \overline{X}]^2$	$(X_j - \overline{X}) * (Y_j - \overline{Y})$	$\lvert Y_j - \overline{Y} \rvert$	$[Y_j - \overline{Y}]^2$	$[Y_j - \hat{Y}_j]^2$
	1	110	14.29%	-1.06757	4.700	-5.0181	22.1	-0.8763	-0.1913	-0.4697	0.2206	0.5014	-1.0676	1.1397	0.0366
	2	120	28.57%	-0.56595	4.787	-2.7095	22.9	-0.7139	0.1480	-0.3827	0.1464	0.2166	-0.5659	0.3203	0.0219
	3	220	71.43%	0.56595	5.394	3.0525	29.1	0.4169	0.1491	0.2235	0.0499	0.1265	0.5659	0.3203	0.0222
N =	4	330	85.71%	1.06757	5.799	6.1909	33.6	1.1733	-0.1058	0.6289	0.3955	0.6714	1.0676	1.1397	0.0112
					Suma	1.5159	107.7353	0.0000	0.0000	0.0000	0.8125	1.5159	0.0000	2.9200	0.0919

Para calcular esta columna se usa del excel la función

$\overline{Y}$	0.00000	$\overline{X}$	5.170
Pendiente	$b = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} x_j * Y_j - N * \overline{X} * \overline{Y}}{\sum_{j=1}^{N} x_j^2 - N * \overline{X}^2} =$		1.8656
Intercepto	$a = \overline{Y} - b * \overline{X} =$		-9.6457

$Ajuste = \sum \lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert =$ **0.0000** Ajuste

$S_e = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} =$ 0.2144 Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico

$r^2 = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y_j})^2}$ 0.9685 Coeficiente de Determinación Muestral

$r = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X}) * (Y_j - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y})^2}} =$ 0.9841 Coeficiente de Correlación Múltiple

LogNormal - Mantenibilidad

Pruebas y cálculos de regresión

	j	t_j	M(t_j)	Y de la regresion $Y_i = f^{-1}[M(t_j)]$	X de la regresion = Ln (t_j)	$X_j * Y_i$	X_j^2	$\hat{Y}_j$	$\lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert$	$(X_j - \overline{X})$	$[X_j - \overline{X}]^2$	$(X_j - \overline{X}) * (Y_j - \overline{Y})$	$\lvert Y_j - \overline{Y} \rvert$	$[Y_j - \overline{Y}]^2$	$[Y_j - \hat{Y}_j]^2$
	1	2	16.67%	-0.96742	0.693	-0.6706	0.4805	-0.8447	-0.1228	-1.4615	2.1361	1.4139	-0.9674	0.9359	0.0151
	2	3	33.33%	-0.43073	1.099	-0.4732	1.2069	-0.6103	0.1796	-1.0561	1.1153	0.4549	-0.4307	0.1855	0.0323
	3	9	50.00%	0.00000	2.197	0.0000	4.8278	0.0246	-0.0246	0.0425	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006
	4	26	66.67%	0.43073	3.258	1.4034	10.6152	0.6377	-0.2070	1.1034	1.2175	0.4753	0.4307	0.1855	0.0428
N =	5	34	83.33%	0.96742	3.526	3.4115	12.4352	0.7927	0.1747	1.3717	1.8815	1.3270	0.9674	0.9359	0.0305
					Suma	3.6711	29.5656	0.0000	0.0000	0.0000	6.3522	3.6711	0.0000	2.2429	0.1213

Para calcular esta columna se usa del excel la función

$\overline{Y}$	0.00000	$\overline{X}$	2.155
$b = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} x_j * Y_j - N * \overline{X} * \overline{Y}}{\sum_{j=1}^{N} x_j^2 - N * \overline{X}^2} =$			0.5779
$a = \overline{Y} - b * \overline{X} =$			-1.2452

$Ajuste = \sum \lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert =$ **0.0000** Ajuste

$S_e = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} =$ 0.2011 Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico

$r^2 = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y_j})^2}$ 0.9459 Coeficiente de Determinación Muestral

$r = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X}) * (Y_j - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y})^2}} =$ 0.9726 Coeficiente de Correlación Múltiple

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

LogNormal - Estimación de Parámetros

No Confiabilidad

Desviación estándar	$Desviación\ \ Estándar = s = \frac{1}{b} = \frac{1}{Pendiente\ \ de\ \ la\ recta\ \ alineada} =$	**0.53601**
Media	$Media = m = -a * s = -Intercepto * DesviaciónEstándar =$	**5.170**
***MTBF* =**	$e^{(m + \frac{s^2}{2})} =$	**203.126**

Mantenibilidad

Desviación estándar	$Desviación\ \ Estándar = s = \frac{1}{b} = \frac{1}{Pendiente\ \ de\ \ la\ recta\ \ alineada} =$	**1.73035**
Media Recuérde que μ es la media de los Ln de t_i	$Media = m = -a * s = -Intercepto * DesviaciónEstándar =$	**2.1547**
***MTTR* =**	$e^{(m + \frac{s^2}{2})} =$	**38.542**

***MTBF* = h * Gamma G (1+ 1/b)**

***MTBF* puntual**	**203.300**

***MTTR* = h * Gamma G (1+ 1/b)**

***MTTR* puntual**	**14.800**

Lectura de Allen - Plait o papel Weibull

Beta	**2.070**
Eta η	**230.00**
MTBF	**203.734**

Beta	**0.7000**
Eta η	**17.00**
MTTR	**21.52**

Los valores que se obtienen de alineación tanto en No Confiabilidad como en Mantenibilidad para LogNormal, del coeficiente de determinación muestral de 0.9685 en No Confiabilidad y 0.9489 en Mantenibilidad, como del coeficiente de correlación con 0.9841 en No Confiabilidad y 0.9726 para Mantenibilidad, están dentro de los rangos de aceptación, por lo cual se acepta como válida la alineación de ambas funciones.

Las tres distribuciones hasta ahora descritas utilizan en forma previa la alineación, a diferencia de la distribución Gamma que utiliza el Método de Máxima Verosimilitud MLE para estimar directamente los parámetros.

3.5.4 Distribución Exponencial

La distribución Exponencial es útil cuando el βeta de Weibull alcanza el valor de 1 ± 0.05 y su Tasa de Fallas tiende a ser constante (esto ocurre en la fase II Weibull, como se instruye en Ilustración 42 - Curva de la bañera o de Davies -). La distribución exponencial es un caso especial de la distribución Gamma, ambas tienen un gran número de aplicaciones. Es la más común entre las distribuciones de fallas, su importancia radica en el hecho de que casi todos los componentes tienen, durante su período de operación normal, una intensidad de falla constante.

La distribución exponencial es la única que posee una intensidad constante de fallas. La distribución exponencial es muy usada para modelar el tiempo de vida de componentes electrónicos y es apropiada cuando un componente usado que aún no falla, es estadísticamente tan bueno como un componente nuevo.
Las distribuciones Exponencial y Gamma juegan un papel importante tanto en teoría de colas como en problemas de confiabilidad. El tiempo entre las llegadas en las instalaciones de servicio y el tiempo de falla de los componentes y sistemas eléctricos, frecuentemente involucran la distribución exponencial. La relación entre la Gamma y la Exponencial permite que la distribución Gamma se utilice en tipos similares de problemas(Gamma-Exp@, 2005).

En especial el autor recomienda usar Gamma o LogNormal cuando el βeta de Weibull está entre 0.95 y 1.05 en sustitución de la distribución Exponencial, por ser las primeras más fáciles de manejar.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ecuación 43 - Función de densidad en Distribución Exponencial

Cuando la variable aleatoria x tiene una distribución exponencial, con parámetro*b*, su función de densidad es:

$$f(x) = \frac{1}{b} x^{\frac{-x}{b}}$$

,

Con x > 0; *f*(*x*) = 0 en cualquier otro caso, donde *b* > 0.

La media y la variancia de la distribución exponencial son $m = b$ y $s^2 = b^2$

(Gamma-Exp@, 2005)

3.5.5 Distribución Gamma

Es una distribución de dos parámetros que tienen propiedades similares a los de la distribución Weibull, el parámetro de escala y el parámetro de forma que pueden ser ajustados a los datos obtenidos con gran flexibilidad. La distribución Exponencial es un caso especial de la distribución Gamma, cuando $a = 1$ (O´Connor, 2002) (Ramakumar, 1996). Cuando αlfa es un entero positivo a Gamma se le denomina la Distribución de Erlang.

La distribución Gamma es muy conveniente para caracterizar los tiempos de fallas de equipos durante períodos de rodaje. Es también muy adecuada para representar sistemas con componentes en *stand-by* (Rojas, 1975). Se puede caracterizar mediante las expresiones:

Ecuación 44 - Distribución Gamma

$$R(t) = \frac{l^a}{\Gamma(a)} \int_t^{\infty} t^{a-1} \exp^{[-t\,t]} dt$$

$$\textit{Función de Densidad de Gamma} = f(t_j) = \frac{l^a}{\Gamma(a)} * (t_j)^{a-1} * \exp^{-l\,t_j}$$

,

para valores positivos de tj, en el evento de que tj sea igual o menor a o, la función de densidad $f(t_j) = 0$, es igual a cero.

Gamma es una distribución de probabilidad continua con dos parámetros: el de forma denominado αlfa (α) y el de escala llamado Lambda *(λ).*

Por cada α mayor que cero, la expresión $(t_j)^{a-1} * e^{-l\,t_j}$ representa una curva positiva e integrable en el rango (α, +∞).

La integral de la distribución es la función Gamma, así: $\Gamma(a) = \int_0^{+\infty} (t_j)^{a-1} * e^{t_j} * dt_j$

Las propiedades más relevantes de la distribución Gamma son:

$$\forall a > 1, \textit{se cumple que } \Gamma(a) = (a-1) * \Gamma(a-1)$$

$$\Gamma(1) = 1$$

$$\forall n \in N, \textit{es válido afirmar que } \Gamma(n) = (n-1)!$$

$$\Gamma\left[\frac{1}{2}\right] = \sqrt{p}\ , \textit{para las condiciones especificadas.}$$

La Función de Confiabilidad y de Tasa de Fallas vienen dadas por

$$\textit{Función de Confiabilidad Gamma} = R(t_j) = \frac{l^a}{\Gamma(a)} * \int_{t_j}^{+\infty} (t_j)^{a-1} * e^{-l * t_j} * dt_j$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$\textit{Función de Tasa de Fallas} = \frac{f(t_j)}{R(t_j)}$$

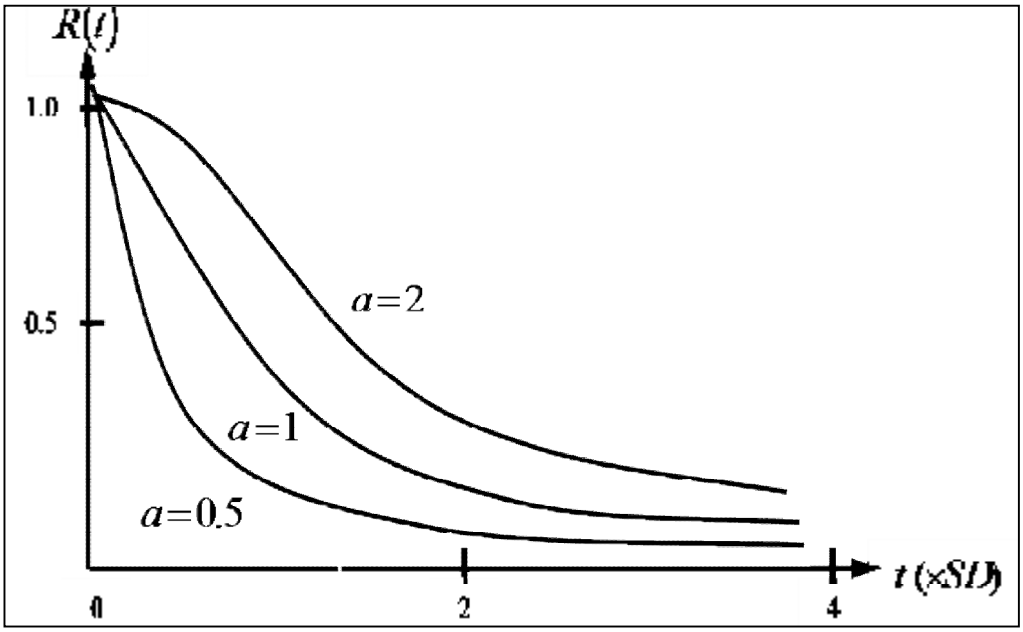
Si t_j es mayor que cero y existen alfa y lambda se define la esperanza matemática como

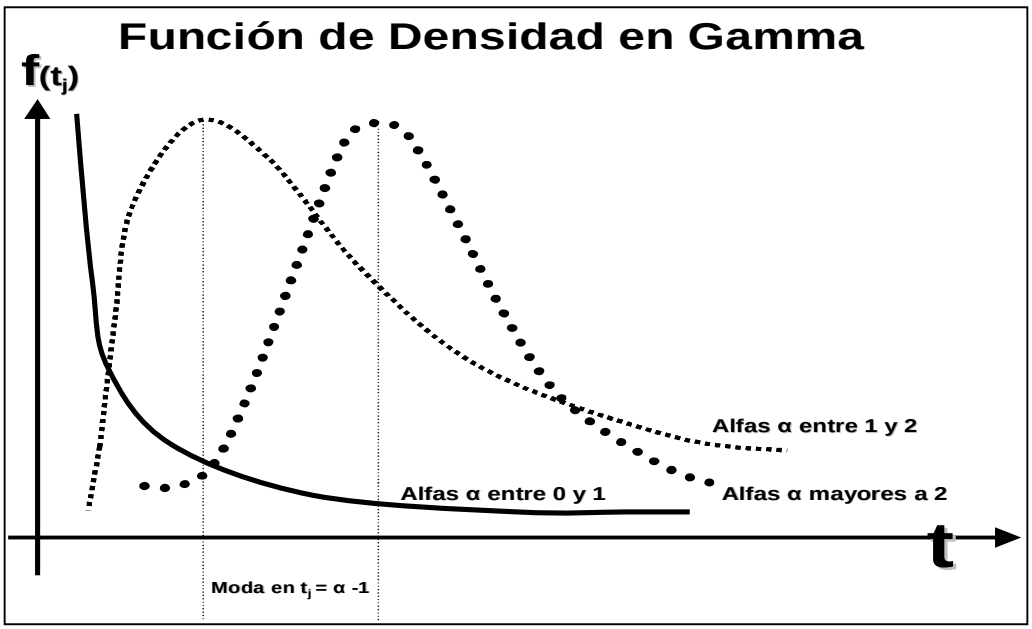
$$\textit{En no confiabilidad } MTBF = E(t_j) = \frac{a}{l}, \textit{ para los valores obtenidos de } a \textit{ y } l \textit{ con } t_j.$$

$$\textit{En mantenibilidad es similar } MTTR = \frac{a}{l}, \textit{ con } a \textit{ y } l \textit{ correspondientes a } t_j.$$

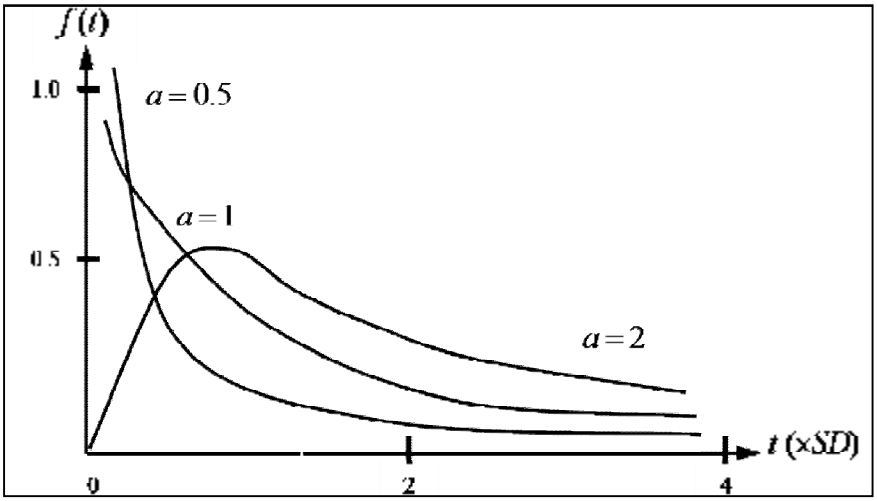
(GammArgen@, 2005) (O´Connor, 2002)

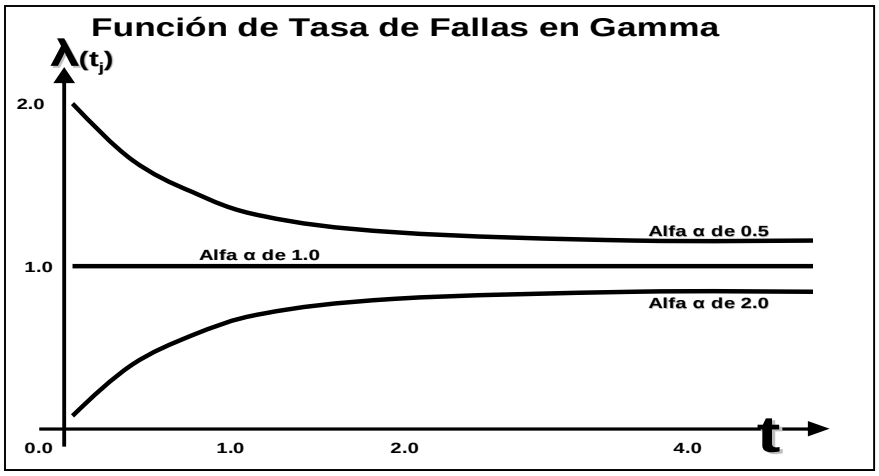
Ilustración 60 - Funciones de Confiabilidad, de Densidad de probabilidad de Fallas y de Tasa de Fallas de la distribución Gamma





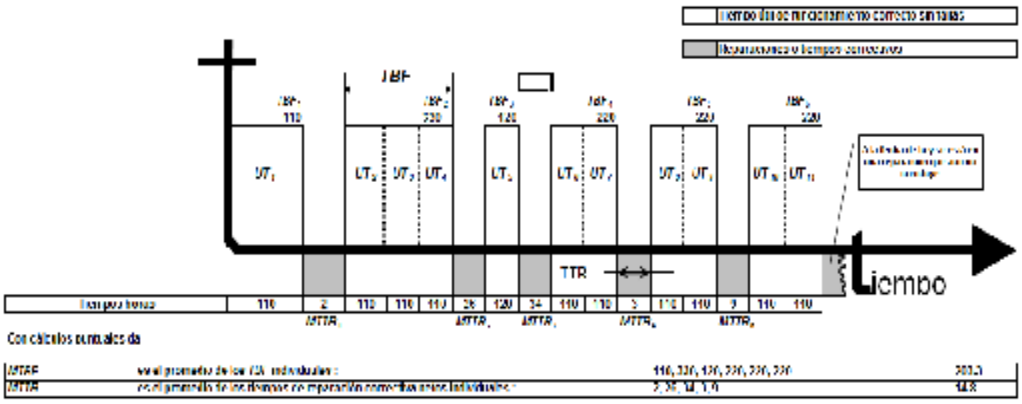
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com





Ejemplo 22 - Cálculo y estimación de parámetros mediante Distribución Gamma para cálculos de A_I

Con el mismo ejemplo que se trae a través del proceso se realizan los cálculos así:



Inicialmente se estiman mediante el método de alineación clásico, que se realiza en este capítulo en la parte anterior.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Método i-kaésimo

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	*F(t)* = j / N + 1
1	110	14.29%
2	330	28.57%
3	120	42.86%
4	220	57.14%
5	220	71.43%
6	220	85.71%
	Media	50.00%

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	*M(t)* = j / N + 1
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
	Media	50.00%

Método i-kaésimo con no repetición de *UT* ni de *DT*

No. Dato j	Datos de operación sin fallas - Runs Hours =λ - en horas	*F(t)* = j / N + 1
1	110	14.29%
2	120	28.57%
5	220	71.43%
6	330	85.71%
	Media	50.00%

No. Dato j	Datos de reparaciones en horas	*M(t)* = j / N + 1
1	2	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	66.67%
5	34	83.33%
	Media	50.00%

Ahora se realiza la alineación, con el método clásico de mínimos cuadrados, en la misma forma que se trabaja en todo este desarrollo.

Transformaciones y Alineación

Normal - No confiabilidad

Pruebas y cálculos de regresión

	j	t_j	$F(t_j)$	Y de la regresion $Y_i = f^{-1}\left[F(t_j)\right]$	X de la regresion	$X_i * Yi$	X_i^2	$\hat{Y}_j$	$\lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert$	$\lvert X_j - \overline{X} \rvert$	$\left[X_j - \overline{X}\right]^2$	$(X_j - \overline{X})*(Y_j - \overline{Y})$	$\lvert Y_j - \overline{Y} \rvert$	$\left[Y_j - \overline{Y}\right]^2$	$\left[Y_j - \hat{Y}_j\right]^2$
	1	110	14.29%	-1.06757	110.000	-117.4328	12100.0	-0.7815	-0.2861	-85.0000	7225.0000	90.7435	-1.0676	1.1397	0.0818
	2	120	28.57%	-0.56595	120.000	-67.9139	14400.0	-0.6896	0.1236	-75.0000	5625.0000	42.4462	-0.5659	0.3203	0.0153
	3	220	71.43%	0.56595	220.000	124.5087	48400.0	0.2299	0.3361	25.0000	625.0000	14.1487	0.5659	0.3203	0.1130
N =	4	330	85.71%	1.06757	330.000	352.2983	108900.0	1.2412	-0.1737	135.0000	18225.0000	144.1220	1.0676	1.1397	0.0302
				Para calcular esta columna se usa del excel la función DISTR.NORM.ESTAND.INV(F(t))	Suma	291.4604	183800.0000	0.0000	0.0000	0.0000	31700.0000	291.4604	0.0000	2.9200	0.2402

$\overline{Y}$	0.00000	$\overline{X}$ 195.000	
Pendiente	$b = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} X_j * Y_j - N * \overline{X} * \overline{Y}}{\sum_{j=1}^{N} X_j^2 - N * \overline{X}^2} =$	0.0092	
Intercepto	$a = \overline{Y} - b * \overline{X} =$	-1.7929	

$Ajuste = \sum \lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert =$	0.0000	Ajuste
$S_e = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} =$	0.3466	Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico
$r^2 = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y}_j)^2}$	0.9177	Coeficiente de Determinación Muestral

$r = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} (x_j - \overline{X}) * (y_j - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (x_j - \overline{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (y_j - \overline{Y})^2}} =$	0.9580	Coeficiente de Correlación Múltiple

Normal - Mantenibilidad

Pruebas y cálculos de regresión

	j	t_j	$M(t_j)$	Y de la regresion $Y_i = f^{-1}\left[M(t_j)\right]$	X de la regresion	$X_i * Yi$	X_i^2	$\hat{Y}_j$	$\lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert$	$(\overline{X}_j - \overline{X})$	$\left[X_j - \overline{X}\right]^2$	$(\overline{X}_j - \overline{X})*(\overline{Y}_j - \overline{Y})$	$\lvert Y_j - \overline{Y} \rvert$	$\left[Y_j - \overline{Y}\right]^2$	$\left[Y_j - \hat{Y}_j\right]^2$
	1	2	16.67%	-0.96742	2.000	-1.9348	4.0000	-0.6296	-0.3378	-12.8000	163.8400	12.3830	-0.9674	0.9359	0.1141
	2	3	33.33%	-0.43073	3.000	-1.2922	9.0000	-0.5804	0.1497	-11.8000	139.2400	5.0826	-0.4307	0.1855	0.0224
	3	9	50.00%	0.00000	9.000	0.0000	81.0000	-0.2853	0.2853	-5.8000	33.6400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0814
	4	26	66.67%	0.43073	26.000	11.1989	676.0000	0.5509	-0.1202	11.2000	125.4400	4.8241	0.4307	0.1855	0.0144
N =	5	34	83.33%	0.96742	34.000	32.8923	1156.0000	0.9444	0.0230	19.2000	368.6400	18.5745	0.9674	0.9359	0.0005
				Para calcular esta columna se usa del excel la función DISTR.NORM.ESTAND.INV(F(t))	Suma	40.8642	1926.0000	0.0000	0.0000	0.0000	830.8000	40.8642	0.0000	2.2429	0.2329

$\overline{Y}$	0.00000	$\overline{X}$ 14.800	
$b = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} X_j * Y_j - N * \overline{X} * \overline{Y}}{\sum_{j=1}^{N} X_j^2 - N * \overline{X}^2} =$		0.0492	
$a = \overline{Y} - b * \overline{X} =$		-0.7280	

$Ajuste = \sum \lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert =$	0.0000	Ajuste
$S_e = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} =$	0.2786	Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico
$r^2 = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y}_j)^2}$	0.8962	Coeficiente de Determinación Muestral

$r = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} (x_j - \overline{X}) * (y_j - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (x_j - \overline{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (y_j - \overline{Y})^2}} =$	0.9467	Coeficiente de Correlación Múltiple

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Al hacer la estimación normal de los parámetros, da un *MTBF* de 195 y un *MTTR* de 14.8

Normal - Estimación de Parámetros

No Confiabilidad

Desviación estándar	Desviación Estándar = σ = 1/b = 1/Pendiente de la recta alineada =	**108.763**
Media	Media μ = a * σ = Intercepto * Desviación Estándar	**195.000**
MTBF =	μ = - a * 1 / b =	**195.000**

Mantenibilidad

Escala	Desviación Estándar σ 1/b 1/Pendiente de la recta alineada	**20.3307**
Forma	Media – μ – – a * σ – – Intercepto * Desviación Estándar –	**14.8000**
MTTR =	μ = - a * 1 / b =	**14.800**

MTBF = η * Gamma Γ (1+ 1/β)

MTBF puntual	203.300

MTTR = η * Gamma Γ (1+ 1/β)

MTTR puntual	14.800

Lectura de Allen - Plait o papel Welbull

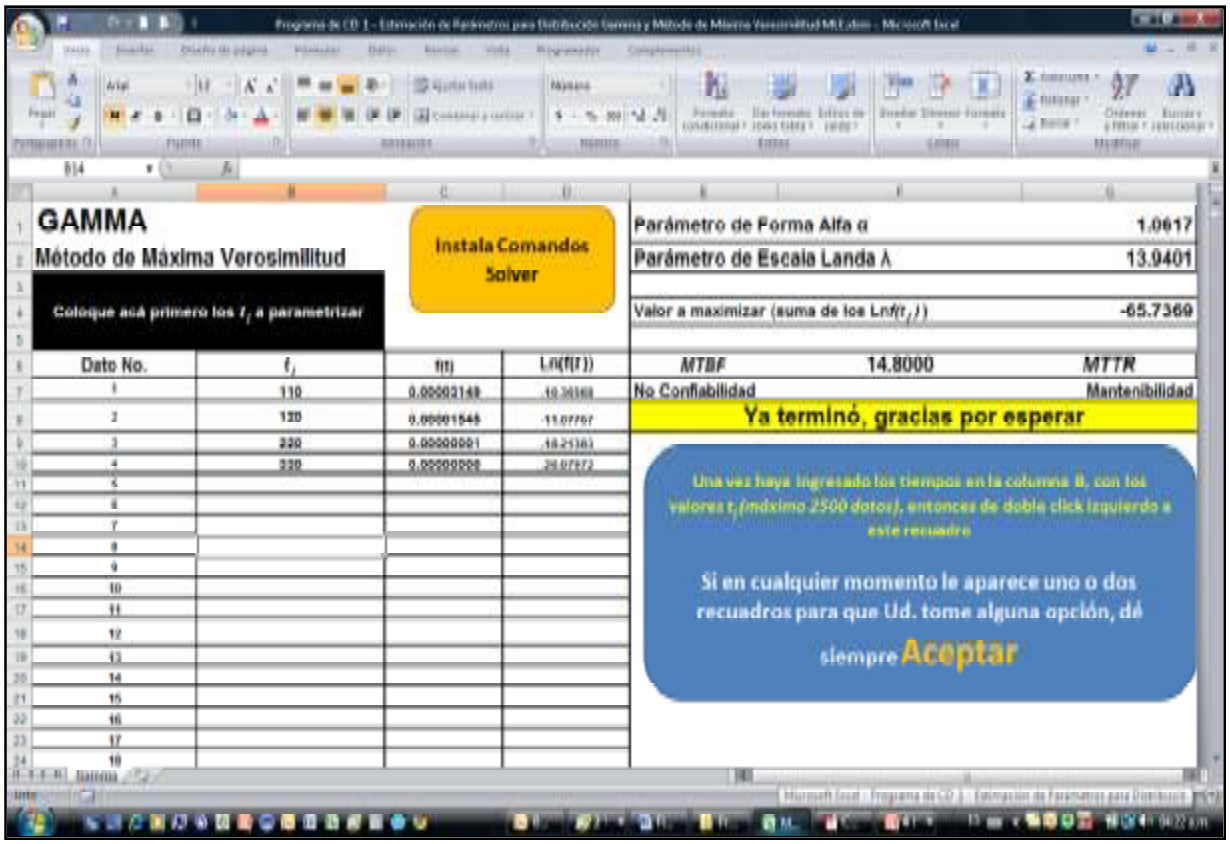
Beta	2.070
Eta η	230.00
MTBF	**203.734**

Beta	0.7000
Eta η	17.00
MTTR	**21.52**

Para poder compararlo, se trabaja ahora con *MLE* (sin alineación) para Distribución Gamma.

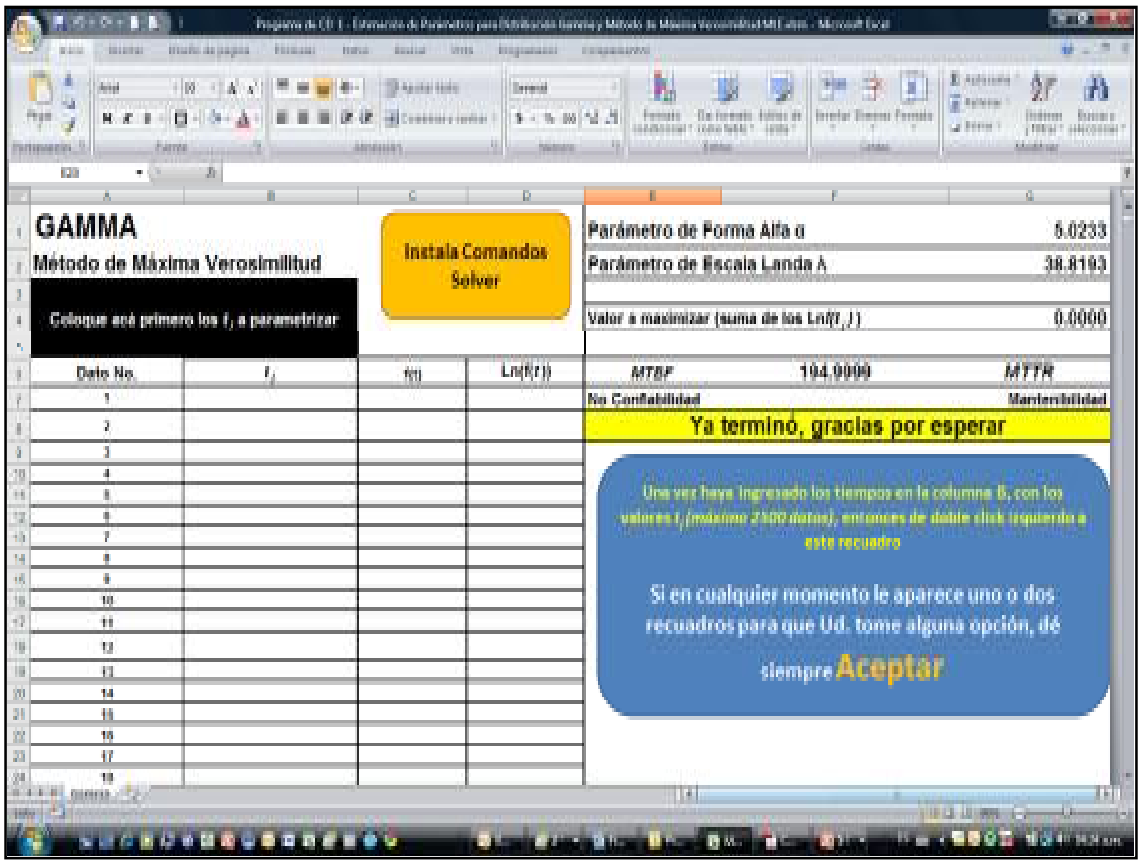
Programa de CD 1 - [Estimación de Parámetros para Distribución Gamma y Método de Máxima Verosimilitud MLE]

Para No Confiabilidad

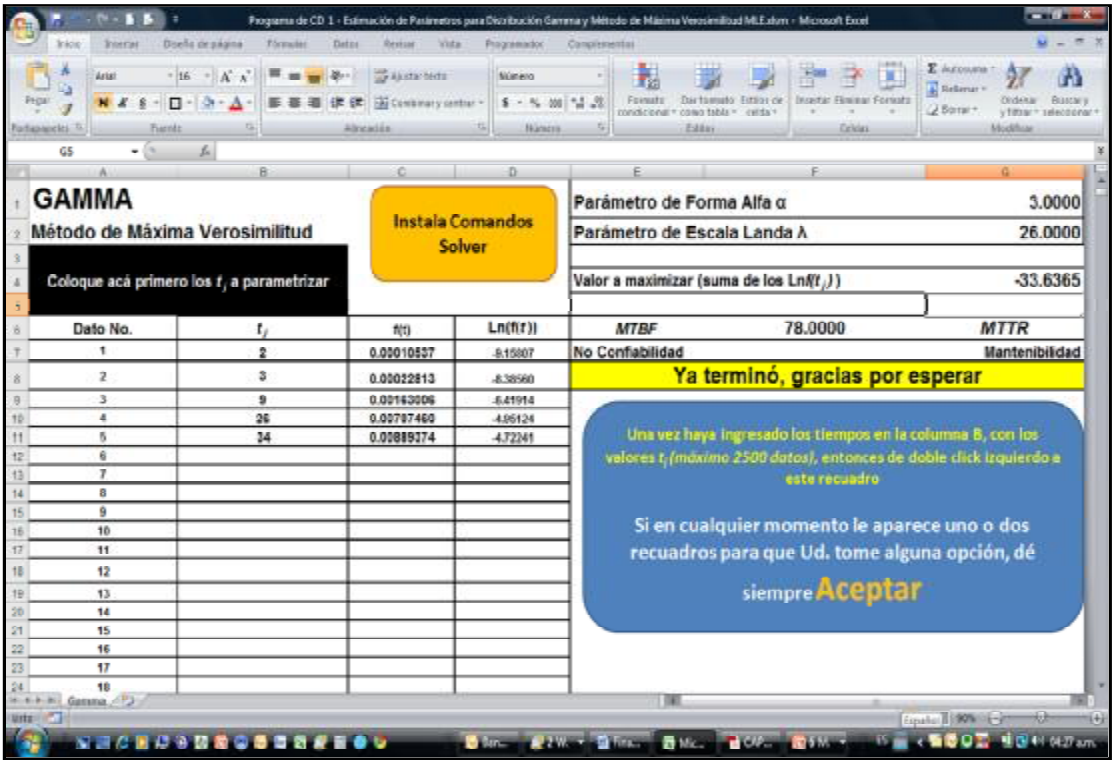


Después de usar la macro con el método *MLE* con múltiples iteraciones y cálculos, entrega los siguientes resultados:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

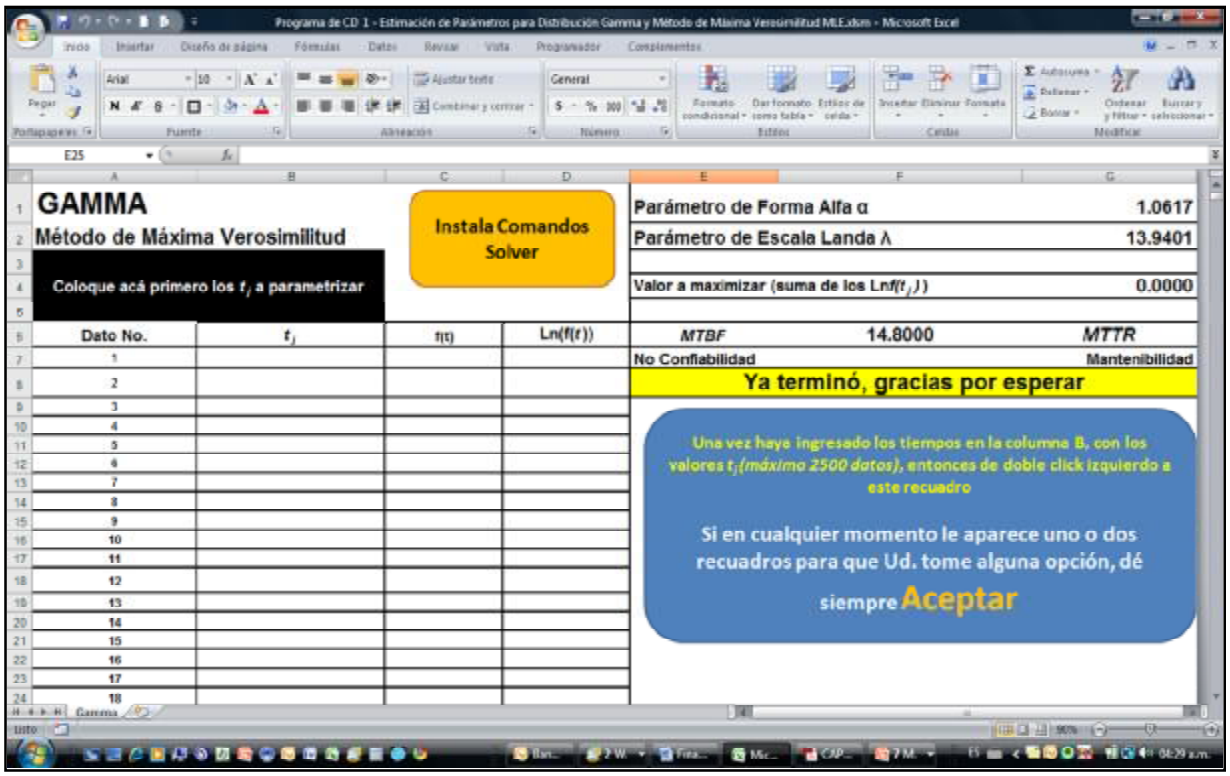


Para Mantenibilidad



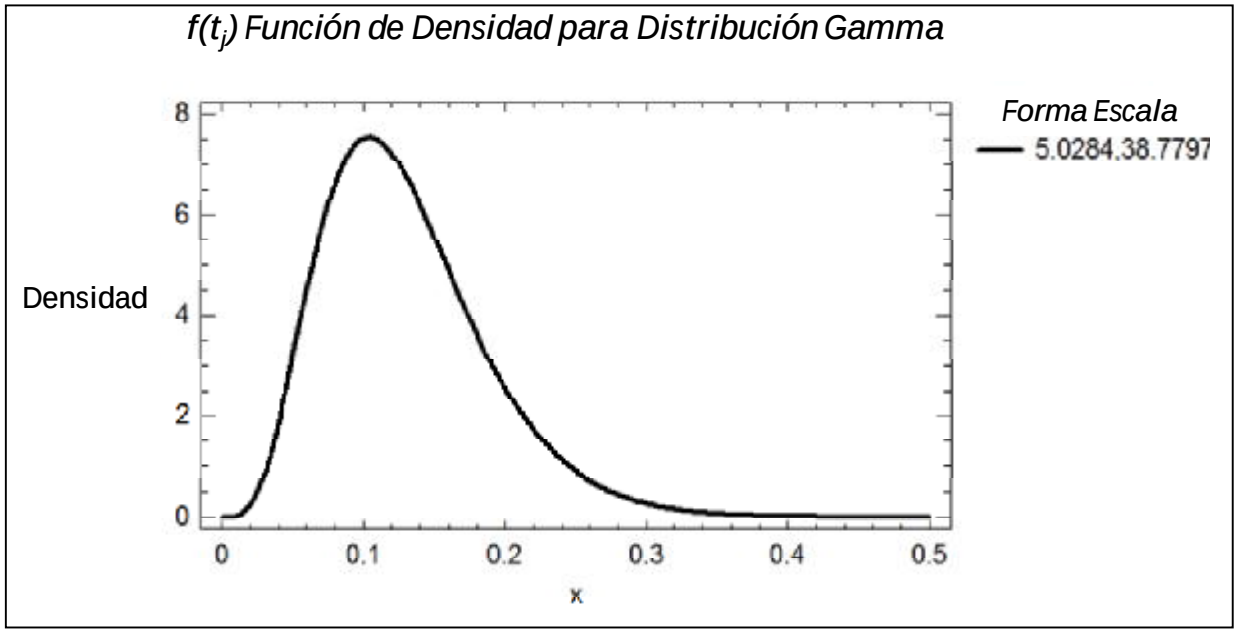
Después de usar la macro con el método *MLE* con múltiples iteraciones y cálculos, entrega los siguientes resultados:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



Directo con Gamma y *MLE*, se obtiene un *MTBF* de 194.98 y un *MTTR* de 14.8000, frente a 195 y 14.98 del método clásico con alineación y regresión, lo que garantiza excelentes resultados.

Ilustración 61 - Función de densidad f (t_j) para Distribución Gamma[167]

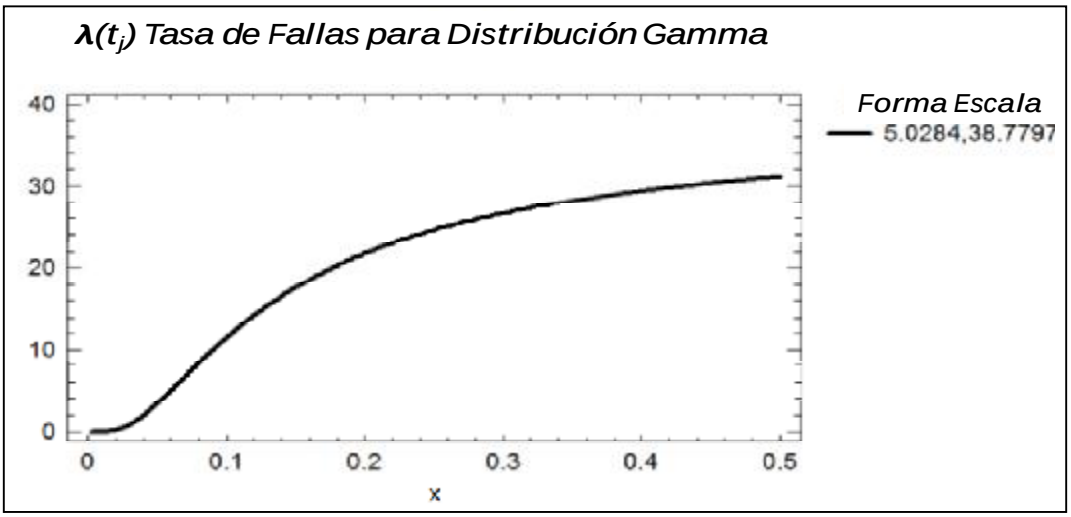


Se observa que con alfa α de Gamma en No Confiabilidad superior a 2, su f(t_j) tiende a parecerse a una distribución normal.

[167] *Construida a partir del software Statgraphics - Versión XV – Centurion, en las opciones - Tools – Probability Distribution – LogNormal – Gráfica Density / Mass Function*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 62 - Tasa de Fallas λ (t_j) para Distribución Gamma[168]



Su tasa de Fallas $\lambda(t_j)$ es muy cóncava, todo señala que tiende a la etapa 2 ó 3 de la Fase III en la curva de la Bañera en Weibull, a pesar de que el alfa del Weibull ya calculado 2.17 (véase Ejemplo 19 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de Weibull para A_I) es superior a 2.05 no cumple para esta zona de Weibull como se explica anteriormente.

En la Mantenibilidad, se observa que con alfa α de Gamma en mantenibilidad de 1, su función de densidad de reparaciones es decreciente y su tasa de Reparaciones $\lambda(t_j)$ es constante, todo señala que tiende a la Fase II en la curva de la Bañera en Weibull, lo que tampoco coincide con el cálculo con Weibull de βeta de 0.68 de la Fase I (Ejemplo 19 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de Weibull para A_I).

Parámetro de Forma Alfa α		**1.0616**
Parámetro de Escala Landa λ		**13.9412**
Valor a maximizar (suma de los Lnf(t_j))		**0.0000**
MTBF	**14.8000**	***MTTR***
		Mantenibilidad

Tanto Distribución Gamma como el Método de Máxima Verosimilitud sirven para muestras amplias, completas y sin datos censurados.

3.6 Método de Máxima Verosimilitud - MLE

Desde el punto de vista estadístico, el método de máxima verosimilitud es el método más robusto para la estimación de parámetros. Tanto en la distribución Gamma como en este *MLE* se procede sin alineación previa y mediante la optimización de funciones con métodos iterativos.

La idea básica de este método es obtener el valor más probable de los parámetros para una distribución dada, a través de la maximización de la función de máxima verosimilitud (L) o la de su logaritmo natural (Λ) aplicada a la función de densidad cuyos parámetros se van a estimar.

Ecuación 45 - Función de máxima verosimilitud

$$L(q_1, q_2, \mathbf{K}, q_k | x_1, x_2, \mathbf{K}, x_R) = L = \prod_{j=1}^{R} f(x; q_1, q_2, \mathbf{K}, q_k)$$

$$\Lambda = Ln(L) = \sum^{R} \ln[f(x; q_1, q_2, \mathbf{K}, q_k)]$$

[168] *Construida a partir del software Statgraphics - Versión XV – Centurion, en las opciones - Tools – Probability Distribution – LogNormal – Gráfica Hazard Function*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Donde:

$f(x_j;\theta_1, \theta_2,..., \theta_n)$: es la función de densidad de la distribución a la que se le estiman los parámetros.
$\theta_1, \theta_2,..., \theta_n$: parámetros por estimar.
X_j: observaciones independientes de los datos de falla.

(Reliasoft@, 2008)

El método de máxima verosimilitud - MLE - tiene muchas propiedades que lo hacen atractivo; entre ellas están: tener una forma asintótica consistente, que significa que al aumentar el tamaño de la muestra el valor estimado converge al valor correcto, ser de naturaleza asintótica eficiente, lo que se refleja en que al aumentar el tamaño de la muestra el valor estimado es más preciso y ser de geometría asintótica imparcial, es decir, que al aumentar el tamaño de la muestra se espera conseguir en promedio el valor correcto.

Sin embargo, el tamaño de la muestra necesaria para alcanzar tales propiedades, requiere un valor considerablemente alto de datos (de entre treinta y cincuenta a más de cien), dependiendo de la aplicación, lo que causa para valores pequeños discrepancias en los análisis (Mora, 2007a) (Reliasoft@, 2008).

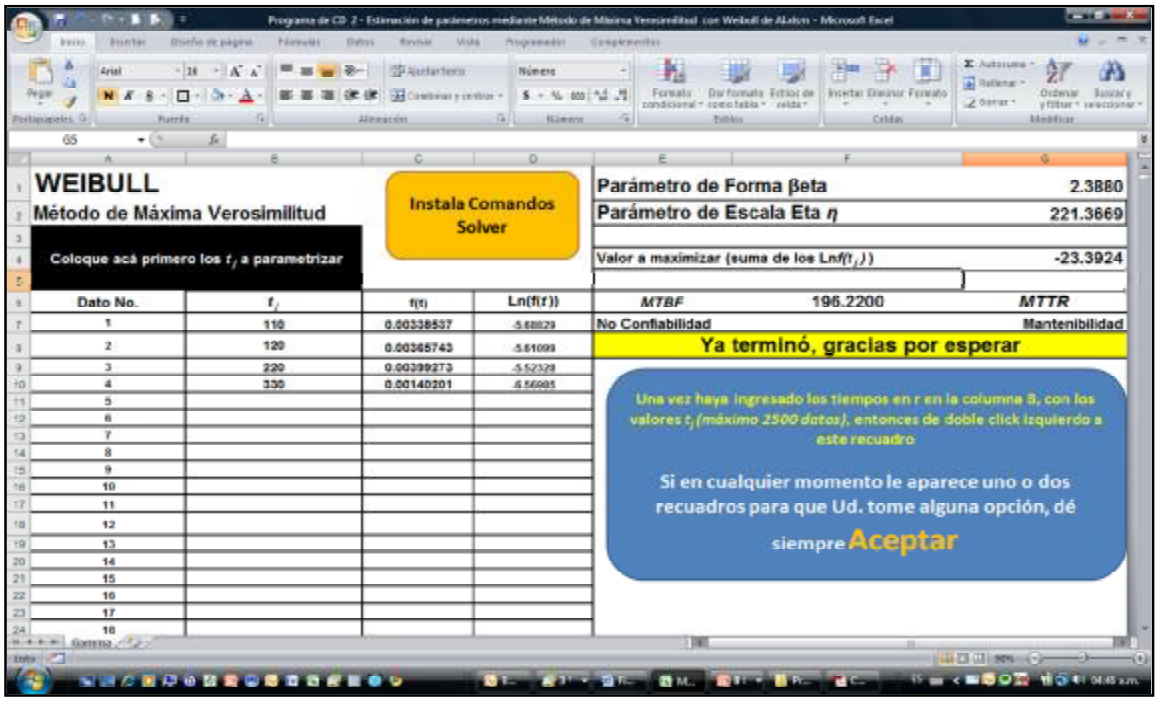
Programa de CD 2 - Estimación de parámetros mediante Método de Máxima Verosimilitud con Weibull de A_I

Al realizar los cálculos con el Software adjunto en el CD: Programa para estimar por Método de Máxima Verosimilitud.xls, se obtienen los siguientes parámetros en el ejercicio que se trae de disponibilidad Inherente[169]:

No confiabilidad

Parámetro de Forma βeta		**2.3881**
Parámetro de Escala Eta η		**221.3674**
MTBF	**196.2206**	**horas**

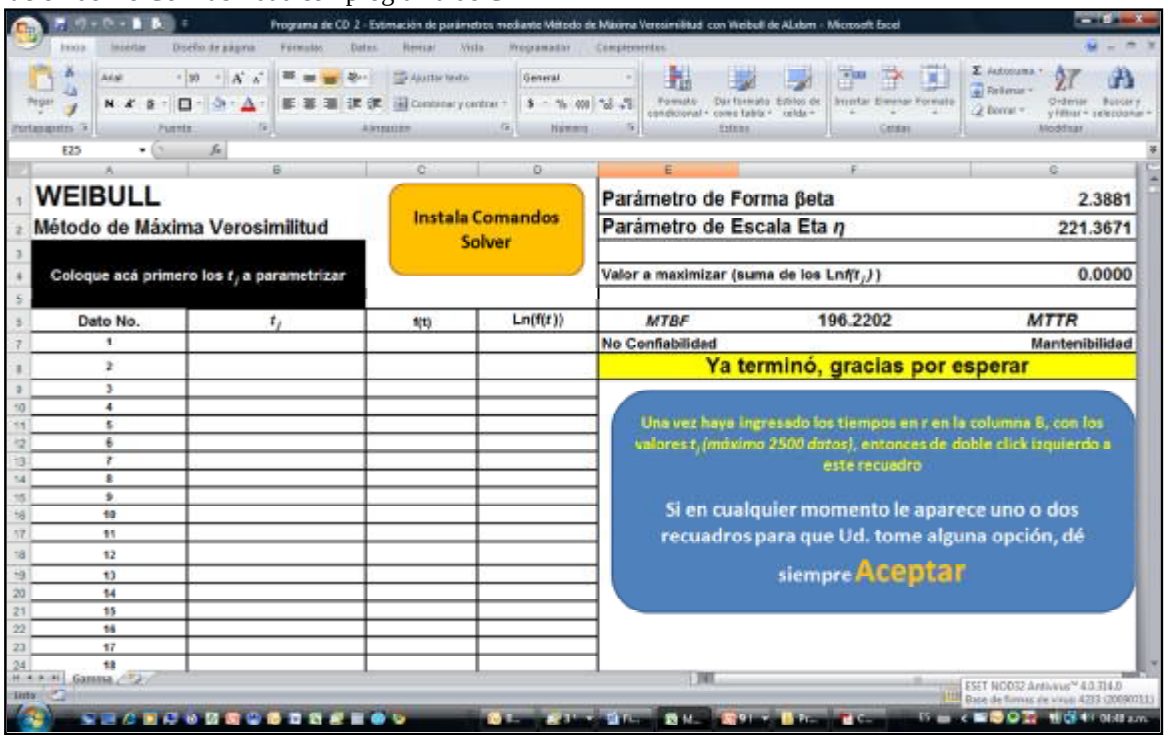
Los valores obtenidos por medio de la distribución Weibull, con alineación de mínimos cuadrados y método i-kaésimo (véase Ejemplo 19 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de Weibull para A_I) de βeta: 2.1712, Eta: η: 223.25 y *MTBF*: 197.71 horas son muy similares a los resultados de *MLE*.



[169] *Para el desarrollo se usa en este libro la distribución Weibull, ya que es concomitante con el modelo propuesto aparte de que cubre bien las tres zonas de la curva de Davies o de Tasa de Fallas.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

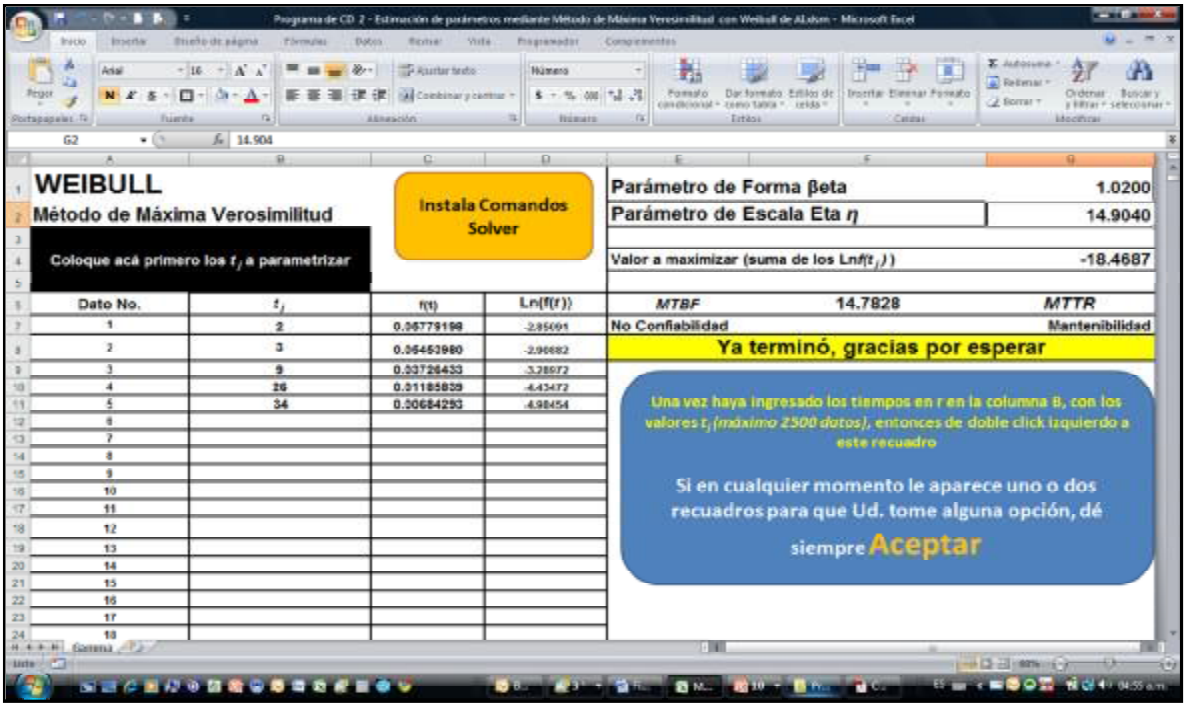
Solución de No Confiabilidad con programa de CD 2



Para Mantenibilidad

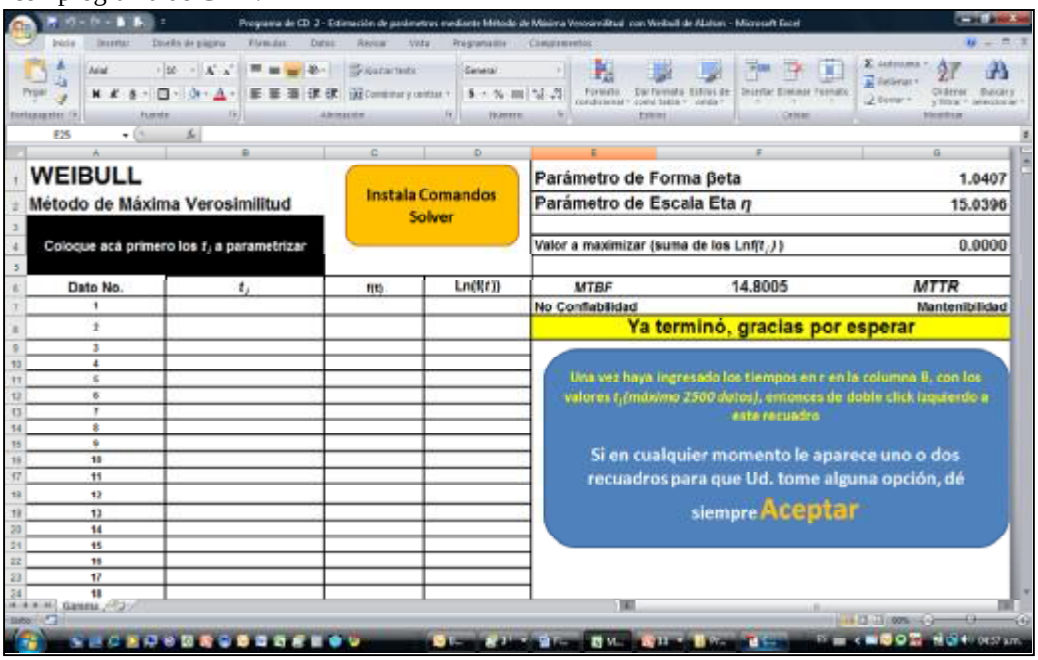
Parámetro de Forma βeta		1.0407
Parámetro de Escala Eta η		15.0398
MTTR	14.8005	horas

Se observa los valores obtenidos por medio de la distribución Weibull, con alineación de mínimos cuadrados y método i-kaésimo (véase Ejemplo 20 - Alineación, pruebas de regresión y estimación de parámetros de distribución Normal para A_I.) de βeta : 0.6815, Eta: η: 16.91 y *MTTR*: 21.97 horas difieren a los hallados por *MLE*. Por lo cual se deben usar varios métodos o solo usar *MLE* para grandes tamaños muestrales.



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Solución con programa de CD 2.



Con el fin de poder realizar cualquier cálculo de CMD, de sus parámetros de sus curvas típicas, tanto para No Confiabilidad como para Mantenibilidad, de los valores de Bondad de Ajuste y del Coeficiente de determinación muestral R^2 y de otros aspectos, se entrega adjunto en el CD programa pertinente para ello.

Programa de CD 3 - Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste.

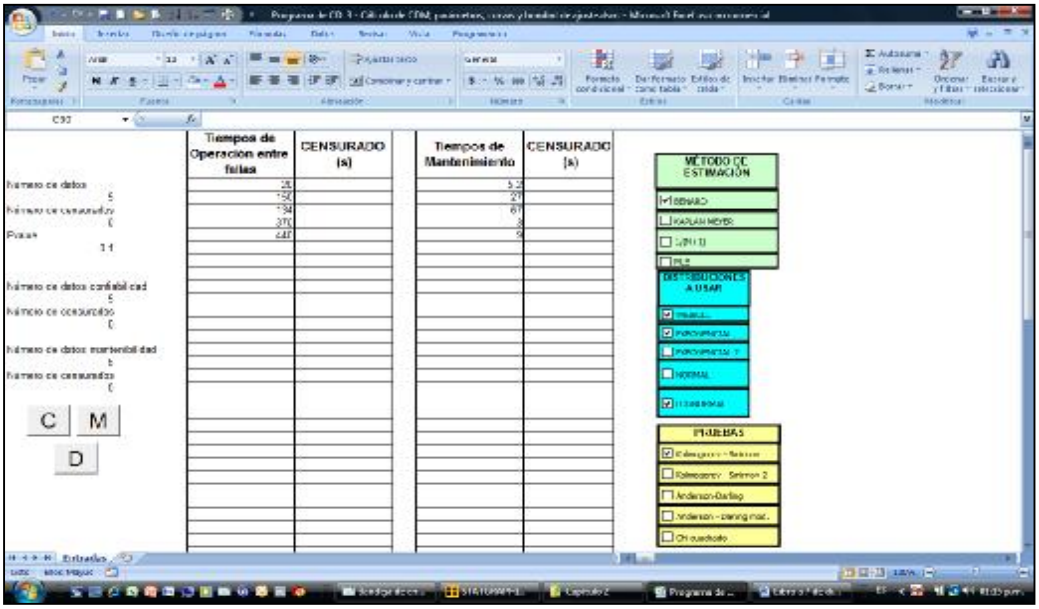


Ilustración 63 - Síntesis comparativa de resultados de MTBF y MTTR con diferentes distribuciones y métodos

	Resultados	Cálculo puntual	Distribución			*MLE*
			Weibull	Normal	LogNormal	
No confiabilidad	Parámetro 1		2.17	108.76	0.54	2.38
	Parámetro 2		223.25	195.00	5.17	221.36
	MTBF	203.30	197.71	195.00	203.12	196.22
No confiabilidad	Parámetro 1		0.68	20.33	1.73	1.04
	Parámetro 2		16.91	14.80	2.15	15.04
	MTTR	14.80	21.97	14.80	38.54	14.80

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Se aprecian *MTBF* muy similares, más no así en los *MTTR*, aunque el que predomina es el de 14.80 horas, con las más atípicos de Weibull y LogNormal.

3.7 Pruebas de Bondad de Ajuste – Goodness of Fit

Las pruebas de bondad de ajuste buscan comprobar una hipótesis, según la cual los datos que se observan corresponden a una distribución seleccionada bajo los parámetros estimados; entre otras pruebas para juzgar el ajuste de una muestra, se incluyen los métodos visuales y las pruebas de tendencia (NS@, 2005).

Las investigaciones estadísticas proporcionan una gran cantidad de pruebas que se pueden realizar para determinar si una muestra de datos, corresponde a una distribución específica; entre ellas están la Ji^2, la de Kolmogórov, la de Kolmogórov-Smirnov, la de Anderson-Darling, la de Cramer von Mises, la de Watson, la de Kuiper, entre otras (Software Statgraphics).

A efectos de comprobación en el método CMD propuesto en la Ilustración 29 - Modelo universal e integral, propuesto para la medición CMD se realizan Ji^2, la de Kolmogórov-Smirnov y la de Anderson-Darling ya que son bastante comunes y se pueden desarrollar con muchos Softwares existentes, a la vez que se complementan unas con otras (Mora, 2007c).

3.7.1 Kolmogórov-Smirnov

La prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov (K-S[170]) se usa para decidir si una muestra de datos proviene de una población con una distribución específica; la prueba está basada en la función de distribución acumulada empírica (FDAE).

La prueba K-S es una medida definida como el máximo valor de la diferencia absoluta entre dos funciones de distribución acumulada. Entre sus ventajas se encuentra que no depende de la distribución con la cual es comparada, lo que le da un alto grado de independencia y de exactitud, es decir, tiene una relación estricta respecto al número de datos y no hay que modificarla para que sea válida. Entre sus desventajas están que tiende a ser más sensible cerca al centro de la distribución que hacia los extremos o colas.

Ecuación 46 - Función de distribución acumulada empírica K-S

Función de distribución acumulada empírica K-S

$$E_N = \frac{n(j)}{N},$$

donde: E_N: función de distribución acumulada empírica

n(i): número de la posición ordenada del dato

N: número total de datos

La prueba K-S está definida como:

H_o: los datos siguen una distribución especificada.

H_a: los datos no siguen la distribución especificada.

(NS@, 2005) (Rojas, 1975)

[170] *Se hace referencia con la abreviación K-S para referirse a la prueba de Kolmogórov-Smirnov.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ecuación 47 - Estadístico de la prueba K-S

$$D = \underset{1<j<N}{máximo} \left| F\left(Y_j\right) - E_j \right|$$

donde $F(Y_j)$: función de distribución acumulada a probar

E_j: función empírica K-S.

(Mora, 2007a)

La prueba es aceptada cuando el valor D es menor que el valor crítico ($D_{crítico}$), para el nivel de significancia seleccionado y rechazada en caso contrario. Los valores críticos se encuentran tabulados en:

Ilustración 64 - Valores críticos para el estadístico D de Kolmogórov - Smirnov[171]

Tamaño de la muestra - n	Nivel de significancia D = máximo absoluto (Fe-Fo)				
n	0.2	0.15	0.1	0.05	0.01
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.510	0.565	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418.
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.210	0.220	0.240	0.270	0.320
30	0.190	0.200	0.220	0.240	0.290
35	0.180	0.190	0.210	0.230	0.270
>35	1.07 / √n	1.14 / √n	1.22 / √n	1.36 / √n	1.63/ √n

3.7.2 Anderson-Darling

La prueba de Anderson-Darling (A-D[172]) se usa para probar si una muestra de datos proviene de una población con una distribución específica. Esta prueba es una modificación de la prueba K-S en la cual se da más peso a los valores extremos o colas.

La prueba A-D hace uso de la distribución específica para el cálculo de los valores críticos; esto le da la ventaja de hacerla más sensible a la prueba y su desventaja es que requiere el cálculo del valor critico para cada distribución de datos (NS@, 2005). La mayoría de los programas estadísticos ofrecen esta prueba.

Ecuación 48 - Hipótesis de distribución acumulada empírica A-D

Función de distribución acumulada empírica A-D

La prueba A-D está definida como:

[171] *√n, denota la raíz cuadrada del tamaño muestral n, en caso en particular*
[172] *Se hace referencia en el documento con la abreviación A-D para referirse a la prueba de Anderson-Darling.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

H_o: los datos siguen una distribución especificada.

H_a: los datos no siguen la distribución especificada.

(NS@, 2005)

Ecuación 49 – Estadístico de la prueba empírica A-D

$$A^2 = -N - \sum_{j=1}^{N} \frac{(2j-1)}{N}\left[\ln F(Y_j) + \ln(1 - F(Y_{N+1-j}))\right],$$

donde N: número total de datos,

$F(Y_j)$: función de distribución acumulada por probar

j: número de la posición ordenada del dato

(NS@, 2005)

La prueba es aceptada cuando el valor A^2 es menor al valor crítico ($A^2_{crítico}$) para el nivel de significancia seleccionado y rechazada en caso contrario (Mora, 2007a) (NS@, 2005).

Ilustración 65 - Valores críticos en Anderson-Darling

Valores críticos de A^2 para las distribuciones Normal y LogNormal.

a	0.1	0.05	0.025	0.01
A^2_{crit}	0.631	0.752	0.873	1.035

Valores críticos de A^2 para las distribuciones exponencial y de Weibull.

a	0.1	0.05	0.025	0.01
A^2_{crit}	0.637	0.757	0.877	1.038

Para muestras o poblaciones pequeñas el valor A^2 debe ser modificado a:

Ecuación 50 - Valores críticos modificados en Anderson-Darling

A^2 modificado para las distribuciones Normal y LogNormal.

$$A_m^2 = A^2\left(1 + \frac{0.75}{N} + \frac{2.25}{N^2}\right)$$

A^2 modificado para las distribuciones exponencial y de Weibull.

$$A_m^2 = A^2\left(1 + \frac{0.2}{\sqrt{N}}\right)$$

(Annis@, 2008)

3.7.3 Ji² – Chi cuadrado

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La prueba *Ji*^{2} Chi cuadrado[173] (χ^2) es usada para probar si una muestra de datos proviene de una población con distribución específica. La prueba puede ser aplicada a cualquier distribución univariada, a la cual se pueda estimar su función de distribución acumulada. La prueba es alternativa a K-S y a A-D (NS@, 2005).

Ecuación 51 - Hipótesis de distribución acumulada empírica Ji^2

La prueba *Ji*^{2} está definida como:

Ho: los datos siguen una distribución especificada.

Ha: los datos no siguen la distribución especificada.

Ecuación 52 - Estadístico para la prueba Chi cuadrado Ji^2

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^{k} \frac{(O_j - Ej)^2}{E_j}$$

donde

k: número de segmentos en los que está dividida la muestra

O_j: frecuencia observada para el segmento j

E_j: frecuencia esperada para el segmento j

(NS@, 2005)

Ecuación 53 - Cálculo de la frecuencia esperada en Ji^2

$$E_j = N(F(Y_u) - F(Y_t))$$

donde F(Y): función de distribución acumulada a probar

Y_u: límite superior para el segmento j

Y_t: límite inferior para el segmento j

N: tamaño de la muestra.

(NS@, 2005)

El test Chi cuadrado *Ji*^{2} se puede aplicar a funciones discretas como la binomial y la de Poisson.

La prueba es sensible a la determinación del número de segmentos; no hay una forma óptima de escogerlos; una manera razonable, sin embargo, consiste en hacer la frecuencia esperada de por lo menos cinco datos. Esta prueba no es válida para muestras pequeñas.

El estadístico sigue aproximadamente una distribución χ^2 con (k-c) grados de libertad, donde k es el número de segmentos y c es el número estimado de parámetros; por lo tanto, la hipótesis se rechaza, si $\chi^2 > \chi^2_{(\alpha, k-c)}$.

Las diferentes pruebas de bondad de ajuste se pueden realizar con el software anexo en Programa de CD 3 - Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste.

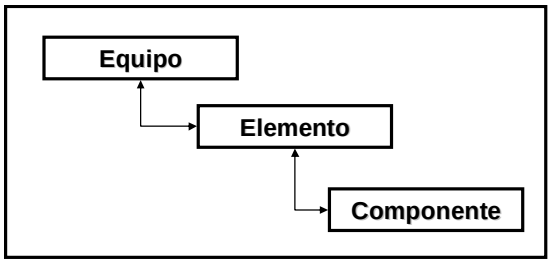
[173] *Se hace referencia en el documento con el símbolo c*^{2} *para referirse a la prueba Ji al cuadrado.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3.8 Estimaciones de sistemas o equipos en serie y paralelo

Para el análisis de CMD en plantas grandes y complejas, se debe establecer una jerarquía de partes clasificadas acorde a sus funciones y a su posibilidad de ser reemplazados (Kelly, y otros, 1998):

Ilustración 66 - Jerarquía en sistemas de producción o servicio



- Componente: es una unidad o partes individuales donde su confiabilidad se estudia independientemente de la de sus partes. Cuando falla un componente se reemplaza y no se repara. Por ejemplo una bombilla, un interruptor o una resistencia (Forcadas, 1983).

- Elemento: es una parte racional de un equipo. Puede estudiarse por separado y considerarse como un sistema en sí mismo. Por ejemplo los frenos de un automóvil o el motor (Rojas, 1975).

- Equipo: es una combinación de partes reunidas para obtener un resultado o una misión conjunta. Los componentes de un sistema fallan independientemente unos de otros. Por ejemplo un automóvil o una red de micro-ondas (Kelly, y otros, 1998).

En cada uno de éstos niveles, los equipos pueden estar conectados en serie, en paralelo o redundantes, en *stand-by*[174], en forma mixta o combinada, entre otros.

3.8.1 Estructura en Serie

Es aquella en que todos los componentes deben funcionar adecuadamente para que funcione el sistema. Una falla en uno de los componentes implica la no funcionalidad de todo el sistema (Bajaria, 1983) (Forcadas, 1983) (Bazovsky, 2004).

El concepto de un circuito en serie se utiliza para definir una representación gráfica de una estructura serie.

El sistema en serie no necesariamente tiene que estar físicamente conectado de esta manera; por ejemplo un sistema con dos componentes en paralelo en el cual para que el sistema funcione correctamente, los dos componentes tienen que funcionar, es un sistema cuyos componentes desde el punto de vista de la confiabilidad están conectados en serie.

La confiabilidad de un sistema en serie disminuye (o crece) si la confiabilidad de cualquiera de sus componentes disminuye (o crece); y disminuye (o crece) si el número de componentes crece (o disminuye) (Gnedenko, y otros, 1999).

Ecuación 54 - Confiabilidad de un sistema en serie

$$R_S = R(x_1) \cdot R(x_2) \mathbf{K} R(x_n)$$

$$R_S = \prod_{j=1}^{N} R(x_j) \equiv \prod_{j=1}^{N} R_j$$

donde R_s: es la confiabilidad del sistema

$R(x_j)$ es la confiabilidad del componente x_j.

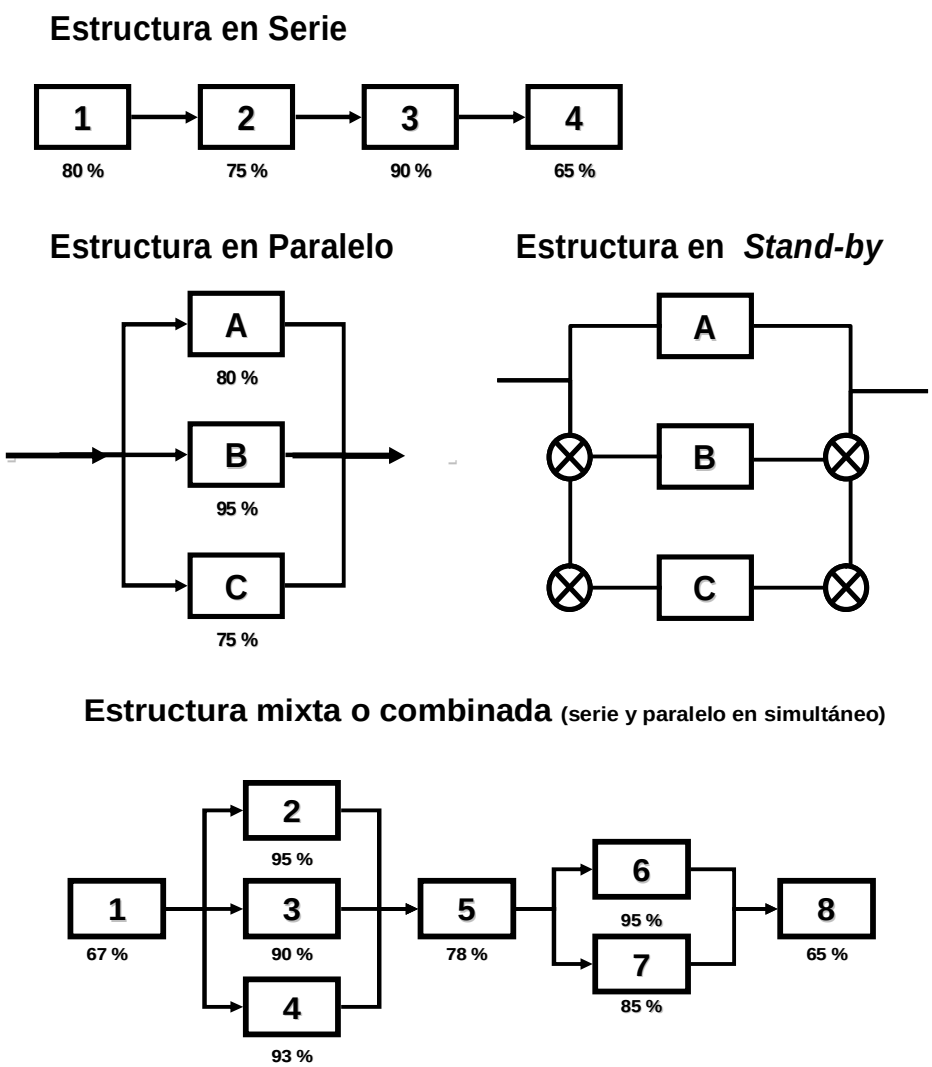
(Gnedenko, y otros, 1999)

[174] *Stand-By o de reserva en castellano.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

En la práctica se demuestra que la dependencia de los componentes afecta sólo ligeramente la confiabilidad de un sistema en serie; sin embargo, la confiabilidad de los sistemas en serie es siempre menor que la del menos confiable de sus componentes (Gnedenko, y otros, 1999)(Ramakumar, 1996).

Ilustración 67 - Estructuras de sistemas de producción o servicio



Si se desea conocer la confiabilidad total del sistema denominado como estructura en serie que se describe en la Ilustración anterior, en la cual cada elemento tiene su confiabilidad en la parte inferior, se estima de la siguiente manera:

Ejemplo 23 - Cálculos de estructuras en serie

Las confiabilidades de cada uno de los elementos en serie dadas en la Ilustración descrita, son: $R(x_1)$ = 80%, $R(x_2)$= 75%, $R(x_3)$= 90% y $R(x_4)$= 65%; donde la confiabilidad de todo el sistema está dada por:

$R_s = R(x_1) * R(x_2) * R(x_3) * R(x_4) = 0.80 * 0.75 * 0.90 * 0.65 = 0.351 = 35.10\,\%$, para una confiabilidad total del sistema de 35.10%.

3.8.2 Estructura en Paralelo o Redundante activa

Es aquella en que el funcionamiento de *k* de los *n* componentes, implica el de todo el sistema.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Un ejemplo es el conjunto de dos motores en un avión bimotor, mientras que funciona uno de los motores, el vuelo aún se mantiene (Bazovsky, 2004) (Nachlas, 1995).

Las estructura en paralelo o redundantes sólo fallan si todos los componentes del sistema dejan de funcionar. Las fallas de uno o más componentes redundantes, normalmente no se detectan y se rectifican, a menos que haya inspecciones periódicas o mantenimientos preventivos.

Es obvio que el *MTBF* del sistema se incrementa cuando se aumentan las frecuencias de inspección. Sin revisiones el *MTBF* se mantiene en el valor calculado para el sistema paralelo. Con inspecciones apropiadas y mantenimientos planeados el *MTBF* se puede incrementar notoriamente; en contraste, si el mantenimiento no es apropiado, es posible que el *MTBF* sea menor que el valor estimado para el sistema en paralelo (Ramakumar, 1996).

Ecuación 55 - Confiabilidad de un sistema de estructura en paralelo con redundancia activa

$$R_S = 1 - [F(\bar{x}_1) * F(\bar{x}_2) \mathbf{K} F(\bar{x}_n)]$$

$$R_S = 1 - \prod_{j=1}^{N} (1 - R(x_j)) \equiv 1 - \prod_{j=1}^{N} F_j$$

donde *Rs* es la confiabilidad de todo el sistema

F_j es la no confiabilidad del componente x

$R(x_j)$ es la confiabilidad dada o calculada del componente j

Otra forma de plantear el resultado es

$$R_s = \sum_{j=1}^{N} R_j - \prod_{j=1}^{N} R_j$$

(Díaz, 1992)

Ejemplo 24 - Cálculos de estructuras en paralelo o redundancia activa[175]

Las confiabilidades de cada uno de los tres elementos (dispuestos en paralelo) dadas en la Ilustración 67 - Estructuras de sistemas de producción o servicio, son: P(A) = 80%, P(B)= 95% y P(C)= 75%, donde la confiabilidad de todo el sistema está dada por:

$$R_s = 1 - \{(1 - R(A)) * (1 - R(B)) * (1 - R(C))\} =$$
$$(1 - \{(1 - 0.80) * (1 - 0.95) * (1 - 0.75)\}) =$$
$$R_s = (1 - 0.2 * 0.05 * 0.25) = 0.9975 = 99.75\,\%$$

Si por alguna razón se aumenta la confiabilidad del elemento A a 90%, sucede que:

$$R_s = 1 - \{(1 - R(A)) * (1 - R(B)) * (1 - R(C))\} =$$
$$(1 - \{(1 - 0.90) * (1 - 0.95) * (1 - 0.75)\}) =$$
$$R_s = (1 - 0.1 * 0.05 * 0.25) = 0.99875 = 99.75\,\%$$

[175] *Se denomina redundancia activa cuando todos los componentes paralelos operan en simultáneo, en otras palabras el sistema opera con todos sus componentes activos, cuando alguno de ellos está disponible pero no funciona y el sistema en general puede operar se le denomina redundancia pasiva.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Por lo cual se puede deducir que si uno de los componentes aumenta (disminuye) su confiabilidad esto a su vez incrementa (reduce) la del sistema.

3.8.3 Estructura en Stand-by [176]

Una estructura en *stand-by* o con respaldo es aquella donde existe una unidad principal respaldada por n unidades de reserva. En ésta estructura sólo trabaja una unidad a la vez, si uno de los componentes falla, su función es reemplazada por otro componente en reserva, para esto es necesario tener un mecanismo detector que transfiera el control en el momento de la falla (Ramakumar, 1996) (Bazovsky, 2004) (Mora, 2007a).

3.8.4 Estructura Mixta

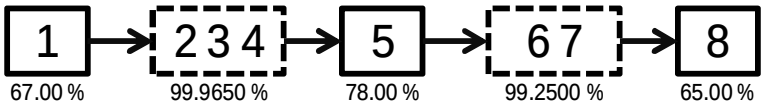
Una estructura mixta es la combinación de dos o más tipos de estructuras elementales, se presenta en la mayoría de los equipos. Para su estudio es necesario realizar equivalencias entre sus componentes, como en el caso de los circuitos eléctricos (Rojas, 1975) (Forcadas, 1983).

Ejemplo 25 - Cálculos de estructura mixta

Las confiabilidades de cada uno de los elementos (dispuestos en estructura mixta) son dadas en la Ilustración 67 - Estructuras de sistemas de producción o servicio; para resolver el sistema, se debe solucionar primero las dos partes en paralelo (2-3-4 y 6-7), una vez halladas sus confiabilidades se asume el nuevo sistema con una estructura en serie compuesta por los elementos: 1 - 2.3.4 - 5 - 6.7 - 8, de la siguiente forma:

$$R_{s\,2\,3\,4} = 1 - \{(1 - R(x_2)) * (1 - R(x_3)) * (1 - R(x_4))\} =$$
$$(1 - \{(1 - 0.95) * (1 - 0.90) * (1 - 0.93)\}) =$$
$$R_{s\,2\,3\,4} = (1 - 0.05 * 0.10 * 0.07) = 0.99965 = 99.9650\,\%$$

y ahora el otro sistema en paralelo



$$R_{s\,6\,7} = 1 - \{(1 - R(x_6)) * (1 - R(x_7))\} =$$
$$(1 - \{(1 - 0.95) * (1 - 0.85)\}) =$$
$$R_s = (1 - 0.05 * 0.15) = 0.9925 = 99.25\,\%$$

con lo cual el sistema equivalente queda así (de tal forma que ahora se resuelve el sistema como una estructura en serie):

$$R_{s1-234-5-678} = R(x_1) * R(x_{234}) * R(x_5) * R(x_{67}) * P(x_8) =$$
$$0.67 * 0.99965 * 0.78 * 0.9925 * 0.65 = 0.351 = 33.70\,\%$$

De donde la confiabilidad total del sistema es 33.70 %.

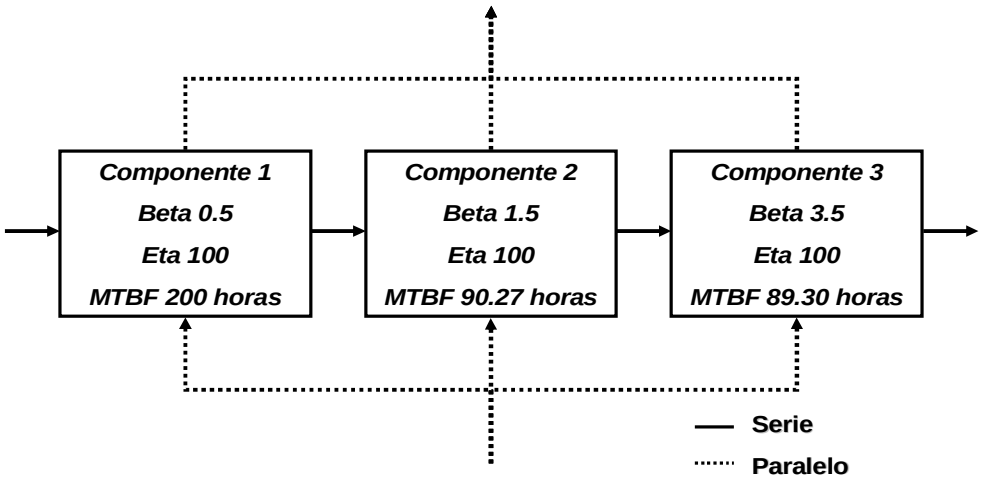
[176] *La traducción en español es Estructura con respaldo (Babylon@, 2008).*

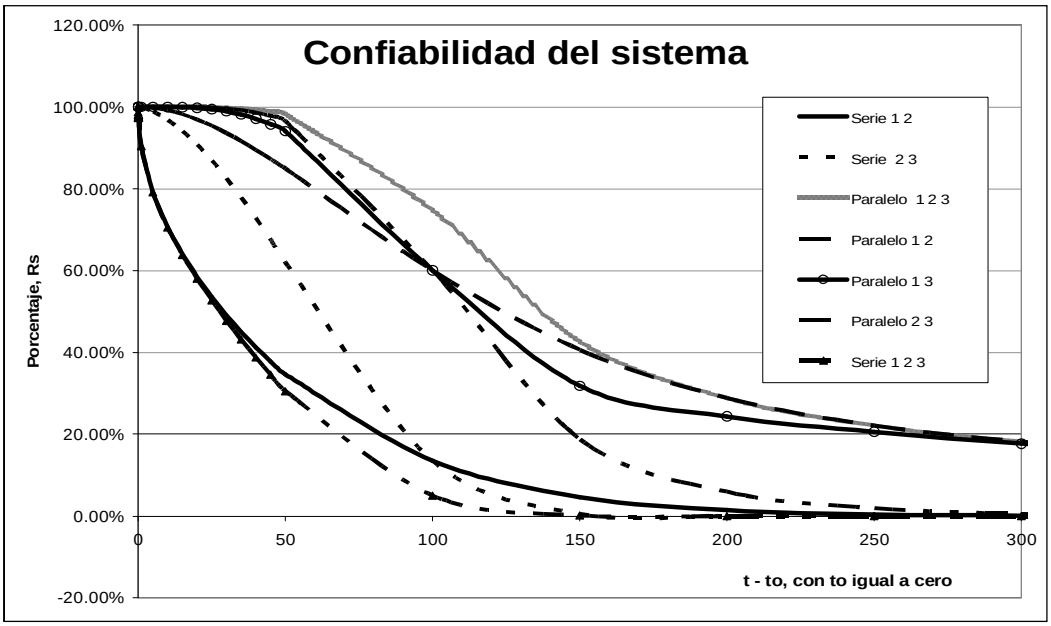
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

En el evento de que no se cuente con los valores de las confiabilidades (o mantenibilidades) en porcentajes, se recurre entonces a la construcción de las curvas de función de densidad *f(t)*, función de no confiabilidad *F(t)*, función de confiabilidad *R(t)* y de Tasa de Fallas *λ(t)*, luego se ubican los valores de *R(t)* para el respectivo *t* solicitado y de esta forma se leen los diferentes valores y se puede estimar de forma puntual.

Ejemplo 26 - Cálculo de confiabilidad Rs, de tres elementos dispuestos en serie y paralelo con parámetros βeta, Eta y MTBF

Se dispone de un sistema con tres componentes organizados en serie y en paralelo de diversas formas, se desea obtener su confiabilidad en cada combinación para un determinado valor de tiempo $t_j - t_o$, se procede de la siguiente forma:





En todos los tiempos se observa que la combinación Paralela 1 2 3, da las mejores confiabilidades (las más altas), como también que las más bajas son las de la Serie 1 2 3.

Para el cálculo de serie se usa $R_s = R_1 * R_2 * \ldots * R_n$ y para paralelo $R_s = 1 - (1-P_1)*(1-P_2)*(1- \ldots\ldots\ldots\ldots) * (1-Pn)$, por ejemplo para un tiempo de $t - t_o$ igual a cien (100) horas se tiene una confiabilidad del sistema en Paralelo 1 2 3 del 74.74 % y en la estructura Serie 1 3 se obtiene una R_s total del sistema del 13.53%.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Los cálculos de cada componente y de los sistemas se expresan así:

Weibull

		Componente 1				Componente 2				Componente 3			
	Factor de Forma βeta	0.50				1.50				3.00			
	Factor de Escala Eta η	100				100				100			
	MTBF (horas)	200				90.27				89.30			
j	$t_j - t_o$	Función de densidad de probabilidad de falla f(t)	Función acumulada de falla o de No Confiabilidad F(t)	Función de Confiabilidad R(t)	Función de Tasa de Falla Lamda(t) = λ(t)	Función de densidad de probabilidad de falla f(t)	Función acumulada de falla o de No Confiabilidad F(t)	Función de Confiabilidad R(t)	Función de Tasa de Falla Lamda(t) = λ(t)	Función de densidad de probabilidad de falla f(t)	Función acumulada de falla o de No Confiabilidad F(t)	Función de Confiabilidad R(t)	Función de Tasa de Falla Lamda(t) = λ(t)
1	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
2	0.02	34.86%	1.40%	98.60%	35.36%	0.02%	0.00%	100.00%	0.02%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
3	0.04	24.50%	1.98%	98.02%	25.00%	0.03%	0.00%	100.00%	0.03%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
4	0.06	19.92%	2.42%	97.58%	20.41%	0.04%	0.00%	100.00%	0.04%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
5	0.08	17.18%	2.79%	97.21%	17.68%	0.04%	0.00%	100.00%	0.04%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
6	1.00	4.52%	9.52%	90.48%	5.00%	0.15%	0.10%	99.90%	0.15%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
7	5.00	1.79%	20.04%	79.96%	2.24%	0.33%	1.11%	98.89%	0.34%	0.01%	0.01%	99.99%	0.01%
8	10.00	1.15%	27.11%	72.89%	1.58%	0.46%	3.11%	96.89%	0.47%	0.03%	0.10%	99.90%	0.03%
9	15.00	0.88%	32.11%	67.89%	1.29%	0.55%	5.64%	94.36%	0.58%	0.07%	0.34%	99.66%	0.07%
10	20.00	0.71%	36.06%	63.94%	1.12%	0.61%	8.56%	91.44%	0.67%	0.12%	0.80%	99.20%	0.12%
11	25.00	0.61%	39.35%	60.65%	1.00%	0.66%	11.75%	88.25%	0.75%	0.18%	1.55%	98.45%	0.19%
12	30.00	0.53%	42.17%	57.83%	0.91%	0.70%	15.15%	84.85%	0.82%	0.26%	2.66%	97.34%	0.27%
13	35.00	0.47%	44.66%	55.34%	0.85%	0.72%	18.70%	81.30%	0.89%	0.35%	4.20%	95.80%	0.37%
14	40.00	0.42%	46.87%	53.13%	0.79%	0.74%	22.35%	77.65%	0.95%	0.45%	6.20%	93.80%	0.48%
15	45.00	0.38%	48.87%	51.13%	0.75%	0.74%	26.06%	73.94%	1.01%	0.55%	8.71%	91.29%	0.61%
16	50.00	0.35%	50.69%	49.31%	0.71%	0.74%	29.78%	70.22%	1.06%	0.66%	11.75%	88.25%	0.75%
17	100.00	0.18%	63.21%	36.79%	0.50%	0.55%	63.21%	36.79%	1.50%	1.10%	63.21%	36.79%	3.00%
18	150.00	0.12%	70.62%	29.38%	0.41%	0.29%	84.07%	15.93%	1.84%	0.23%	96.58%	3.42%	6.75%
19	200.00	0.09%	75.69%	24.31%	0.35%	0.13%	94.09%	5.91%	2.12%	0.00%	99.97%	0.03%	12.00%
20	250.00	0.07%	79.43%	20.57%	0.32%	0.05%	98.08%	1.92%	2.37%	0.00%	100.00%	0.00%	18.75%
21	300.00	0.05%	82.31%	17.69%	0.29%	0.01%	99.45%	0.55%	2.60%	0.00%	100.00%	0.00%	27.00%
22	350.00	0.04%	84.60%	15.40%	0.27%	0.00%	99.86%	0.14%	2.81%	0.00%	100.00%	0.00%	
23	400.00	0.03%	86.47%	13.53%	0.25%	0.00%	99.97%	0.03%	3.00%	0.00%	100.00%	0.00%	
24	450.00	0.03%	88.01%	11.99%	0.24%	0.00%	99.99%	0.01%	3.18%	0.00%	100.00%	0.00%	
25	500.00	0.02%	89.31%	10.69%	0.22%	0.00%	100.00%	0.00%	3.35%	0.00%	100.00%	0.00%	
26	550.00	0.02%	90.42%	9.58%	0.21%	0.00%	100.00%	0.00%	3.52%	0.00%	100.00%	0.00%	
27	600.00	0.02%	91.37%	8.63%	0.20%	0.00%	100.00%	0.00%	3.67%	0.00%	100.00%	0.00%	
28	650.00	0.02%	92.19%	7.81%	0.20%	0.00%	100.00%	0.00%	3.82%	0.00%	100.00%	0.00%	
29	700.00	0.01%	92.90%	7.10%	0.19%	0.00%	100.00%	0.00%	3.97%	0.00%	100.00%	0.00%	
30	750.00	0.01%	93.53%	6.47%	0.18%	0.00%	100.00%	0.00%	4.11%	0.00%	100.00%	0.00%	
31	800.00	0.01%	94.09%	5.91%	0.18%	0.00%	100.00%	0.00%	4.24%	0.00%	100.00%	0.00%	
32	850.00	0.01%	94.58%	5.42%	0.17%	0.00%	100.00%	0.00%	4.37%	0.00%	100.00%	0.00%	
33	900.00	0.01%	95.02%	4.98%	0.17%	0.00%	100.00%	0.00%	4.50%	0.00%	100.00%	0.00%	
34	950.00	0.01%	95.41%	4.59%	0.16%	0.00%	100.00%	0.00%	4.62%	0.00%	100.00%	0.00%	
35	1000.00	0.01%	95.77%	4.23%	0.16%	0.00%	100.00%	0.00%	4.75%	0.00%	100.00%	0.00%	

	Confiabilidad del sistema - R_S								
j	$t_j - t_o$	Serie 1 2 3	Serie 1 2	Serie 1 3	Serie 2 3	Paralelo 1 2 3	Paralelo 1 2	Paralelo 1 3	Paralelo 2 3
1	0.00	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
2	0.02	98.60%	98.60%	98.60%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
3	0.04	98.02%	98.02%	98.02%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
4	0.06	97.58%	97.58%	97.58%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
5	0.08	97.21%	97.21%	97.21%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
6	1.00	90.39%	90.39%	90.48%	99.90%	100.00%	99.99%	100.00%	100.00%
7	5.00	79.06%	79.07%	79.95%	98.88%	100.00%	99.78%	100.00%	100.00%
8	10.00	70.55%	70.62%	72.82%	96.79%	100.00%	99.16%	99.97%	100.00%
9	15.00	63.84%	64.06%	67.66%	94.04%	99.99%	98.19%	99.89%	99.98%
10	20.00	58.00%	58.47%	63.43%	90.72%	99.98%	96.91%	99.71%	99.93%
11	25.00	52.70%	53.53%	59.71%	86.88%	99.93%	95.38%	99.39%	99.82%
12	30.00	47.76%	49.06%	56.29%	82.59%	99.83%	93.61%	98.88%	99.60%
13	35.00	43.10%	44.99%	53.02%	77.88%	99.65%	91.65%	98.13%	99.22%
14	40.00	38.70%	41.25%	49.83%	72.83%	99.35%	89.52%	97.09%	98.61%
15	45.00	34.51%	37.81%	46.68%	67.50%	98.89%	87.27%	95.74%	97.73%
16	50.00	30.55%	34.62%	43.51%	61.97%	98.23%	84.90%	94.04%	96.50%
17	100.00	4.98%	13.53%	13.53%	13.53%	74.74%	60.04%	60.04%	60.04%
18	150.00	0.16%	4.68%	1.01%	0.55%	42.66%	40.63%	31.80%	18.80%
19	200.00	0.00%	1.44%	0.01%	0.00%	28.81%	28.79%	24.34%	5.94%
20	250.00	0.00%	0.40%	0.00%	0.00%	22.10%	22.10%	20.57%	1.92%
21	300.00	0.00%	0.10%	0.00%	0.00%	18.15%	18.15%	17.69%	0.55%
22	350.00	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	15.52%	15.52%	15.40%	0.14%
23	400.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	13.56%	13.56%	13.53%	0.03%
24	450.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	11.99%	11.99%	11.99%	0.01%
25	500.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	10.69%	10.69%	10.69%	0.00%
26	550.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	9.58%	9.58%	9.58%	0.00%
27	600.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	8.63%	8.63%	8.63%	0.00%
28	650.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	7.81%	7.81%	7.81%	0.00%
29	700.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	7.10%	7.10%	7.10%	0.00%
30	750.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	6.47%	6.47%	6.47%	0.00%
31	800.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.91%	5.91%	5.91%	0.00%
32	850.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.42%	5.42%	5.42%	0.00%
33	900.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.98%	4.98%	4.98%	0.00%
34	950.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.59%	4.59%	4.59%	0.00%
35	1000.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.23%	4.23%	4.23%	0.00%

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Los conceptos de estructuras en serie y paralelo no aplican en forma muy clara a mantenibilidad, ya que este concepto es propio de la gestión de mantenimiento que realicen los diferentes grupos de trabajo humano que los ejecutan, a diferencia de la confiabilidad que es una característica inherente al equipo.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3.9 Resumen del Capítulo 3 – Parámetros y Distribuciones - CMD

Esta tercera sección aporta las diferentes metodologías, métodos, fundamentos, cálculos, fórmulas, criterios, etc., necesarios para poder realizar los pasos de parametrización y cálculo de *F(t)*, *R(t)*, *M(t)*, *f(t)*, *l(t)*, etc., de cualquiera de las distribuciones explicadas, de tal manera que se puede caracterizar y monitorear su comportamiento futuro, mediante las predicciones CMD, por los modelos puntual y de distribuciones, para establecer las estrategias, las tácticas y las tareas óptimas del mantenimiento y de la producción.

3.10 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 3

- En los diferentes modelos de parametrización de *F(t)* y de *M(t)*, ¿cuáles son los más favorables en términos de criticidad, explique el porqué?

- ¿Por qué siempre el Modelo de Parametrización de Kaplan-Meier es el más desfavorable en criticidad, a la hora de estimar los parámetros y funciones?

- Explique los criterios estadísticos de ajuste, error típico, variación, error estándar del estimado, coeficiente de determinación muestral y el ajustado, coeficiente de correlación múltiple, etc., para validar las alineaciones, explicando en cada caso sus usos y aplicaciones, sus rangos de validez y sus diferencias.

- La metodología de datos censurados, ¿qué pasos lleva a cabo para la estimación de parámetros de *F(t)* y de *M(t)*, en términos de comparación con los datos no censurados, cuál es más conveniente y por qué?

- Explique la aplicación real, sus lecturas, manejo de datos, interpretación de resultados y diferencias en el comportamiento del equipo que se analiza, mediante las Curvas de No Confiabilidad, de Confiabilidad o Supervivencia y la de Mantenibilidad, coloque por favor de lectura puntual y de distribución, en cada gráfica.

- Explique detalladamente el método de Parametrización en Weibull y en otras distribuciones, tratadas en el capítulo.

- ¿Cuáles son las principales diferencias, semejanzas, aplicaciones y desventajas de las distribuciones: Weibull, LogNormal, Erlang, Rayleigh, Gamma, Exponencial y Normal? – ¿Cuándo se deben usar y porqué? – Describa el comportamiento en cada caso de sus curvas de No Confiabilidad, Mantenibilidad, Supervivencia o Confiabilidad, Función de densidad $f(t_i)$ de probabilidad de fallas, Tasa de Fallas $l(t_i)$ y por favor encuentre en cada la similitud en zonas de etapas de la curva de la bañera.

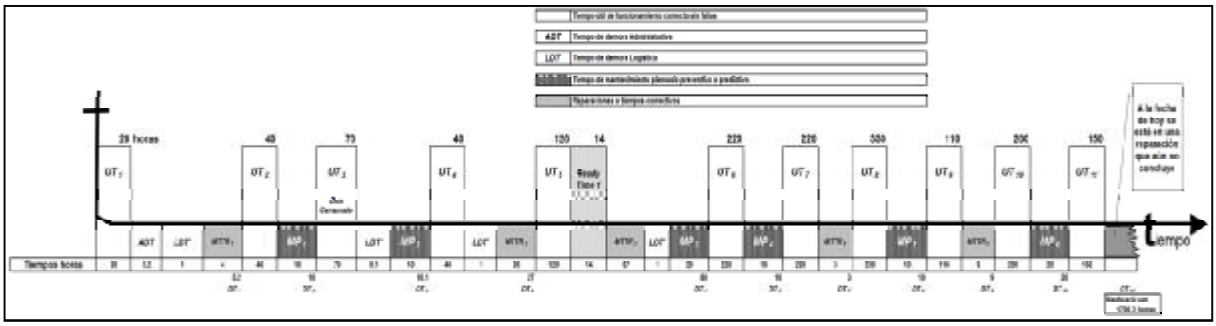
- ¿En qué consisten los modelos de bondad de ajuste?, ¿para qué sirven?, ¿cómo se usan?, establezca algunas diferencias y ventajas entre Kolmogórov-Smirnov y Anderson-Darling, ¿en qué ocasiones se recomienda usar el Ji^2 – Chi cuadrado?

- Por favor establezca las diferencias y los distintos métodos de cálculo, de los sistemas estructurales de equipos en Serie, Paralelo, Stand-by, Mixto y Combinado, explicando en cada caso. ¿Cuál de ellos presenta las mejores probabilidades de Confiabilidad y Mantenibilidad? ¿Cuál presenta los menores valores?

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ejercicio 1 - Integral de Capítulos 2 y 3

Datos:



Problema 1- Esquematice los mapas No Planeado (Correctivo y/o Modificativo) y Planeado (Preventivos y/o Predictivos)

Problema 2 - Haga los cálculos puntuales de *MTBF*, *MTTR* y de la Disponibilidad

Problema 3 - Seleccione la Disponibilidad más apropiada y calcule todos los valores correspondiente con el Método Puntual, compare con la anterior y explique el por qué de la diferencia.

Problema 4 - Elija la Disponibilidad más apropiada y calcule todos los parámetros y los valores correspondiente con el Método de Distribuciones, utilizando los métodos i-kaésimo, Tabla de Rango de Medianas, Benard de Rango de Medianas y Kaplan-Meier; maneje el método de Excel de regresión para el cálculo en la alineación, determine βeta y Eta η en cada caso, calcule los valores necesarios de Disponibilidad y establezca el por qué de las diferencias, con los procesos anteriores. Examine los valores de βeta para $MTBM_C$, $MTBM_P$, *MTTR*, M_P y verifique que estén en la zona correcta de la Curva de la Bañera. Haga las predicciones futuras en horas de $MTBM_C$, $MTBM_P$, *MTTR y* M_P tanto para el cálculo con Distribuciones como para el método puntual, para el 30% del tiempo actual.

Problema 5 - Calcule los *F(t)* y los *M(t)* para Mapa No Planeado como para el Planeado con datos censurados , observe y analice las diferencias con datos normales. Determine las conclusiones.

Problema 6 - Calcule los valores de $MTBM_C$, $MTBM_P$, *MTTR y* M_P, mediante la Distribución Gamma y con el Método MLE, compare con los valores obtenidos con Weibull por Distribuciones y por el Método Puntual, utilizando el Programa de CD 1 y luego con el Programa CD 2 de Weibull con *MLE*.

Problema 7 - Calcule los valores de $MTBM_C$, $MTBM_P$, *MTTR y* M_P, mediante diferentes Distribuciones y métodos de parametrización y alineación con Programa CD 3, analizando los diferentes resultados obtenidos de cada caso, sus curvas y ubicación estratégica con la Curva de Davies o Bañera.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4 Aplicación CMD - Estrategias y Acciones

Con el fin de utilizar los conceptos desarrollados en los capítulos anteriores de una forma integral, se realiza la estimación CMD con alineación y distribuciones, en el cálculo de Disponibilidad Operacional descrito en el Ejemplo 4 - Disponibilidad Operacional (cálculos puntuales sin distribuciones) - D_O.

4.1 Objetivo de Capítulo 4

Realizar los cálculos de predicción CMD de un ejemplo de tal manera que se lleven a cabo todos los pasos de alineación, parametrización, cálculos, predicción, bondades de ajustes, verificación estadística, etc., exigidos en el Modelo Universal propuesto para la predicción del CMD, estableciendo estrategias y acciones adecuadas, acordes sus valores de parámetros pronosticados y con base en las mejores prácticas internacionales – Nivel 3 – Aplicar – Escala de Bloom, Barret y Gagñé (Gagné@, y otros, 2008).

4.2 Introducción a Capítulo 4

La unidad cuatro pretende mostrar una aplicación integral con todos y cada uno de los pasos mínimos requeridos para predecir el comportamiento CMD de un ejemplo real; mediante la utilización y el refuerzo de todos los conceptos desarrollados en los capítulos dos y tres; con el fin de utilizarlos en forma práctica, para pronosticar el comportamiento futuro del mantenimiento y de la operación de las máquinas, líneas de producción o fábricas.

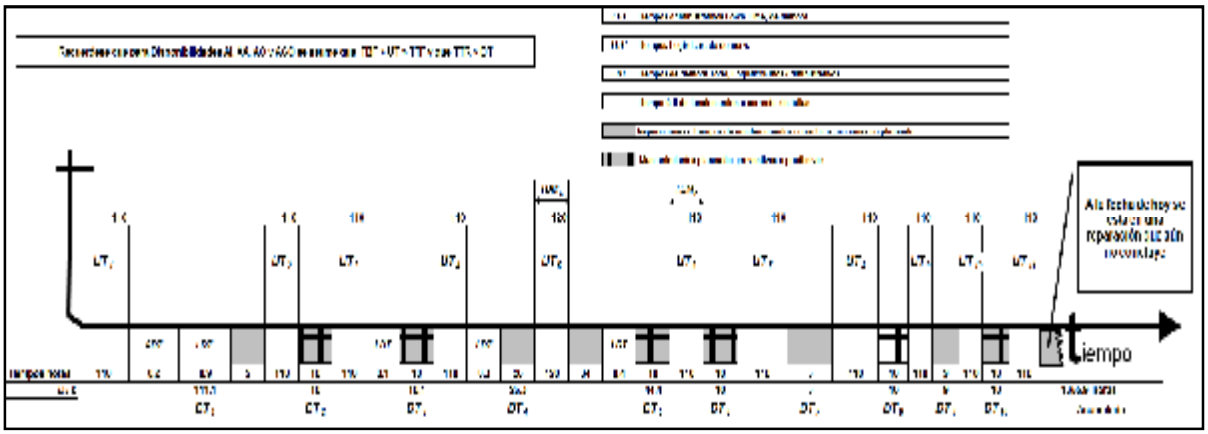
4.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 4 – Aplicación CMD – Estrategias y Acciones

Se debe tener un pleno dominio de los modelos de alineación con mínimos cuadrados o regresión, como del modelo *MLE* que no la requiere, al igual de los pasos previos y fundamentales en la predicción del CMD, es importante que el lector pueda diferenciar las ventajas y limitaciones de cada una de las aplicaciones en las diferentes disponibilidades estandarizadas mundialmente, para una mejor claridad y precisión de los resultados; mediante el manejo de cada paso en la estimación de parámetros de las diferentes distribuciones explicadas y de sus chequeos estadísticos, como de bondad de ajuste.

4.3 Desarrollo de ejercicio integral CMD

Ejemplo 27 - Aplicación Integral con cálculos con distribuciones

Las condiciones iniciales del registro histórico de datos son:



El primer paso consiste en revisar los pasos de la metodología propuesta en la Ilustración 29 - Modelo universal e integral, propuesto para la medición CMD, donde lo primero que se decide es qué se hace con los datos, el proceso de pronóstico se hará al final y no al inicio y también se resuelve utilizar en el ejemplo la disponibilidad operacional, dado que trabaja con demoras.

Cada uno de los pasos de la metodología propuesta, se sigue en el ejemplo que se desarrolla, donde se muestran

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

los pasos y cálculos de cada etapa, con sus respectivas pruebas de alineación y bondad de ajuste.

El segundo paso que se resuelve es tomar como base de estimación el método Weibull, con alineación y sus respectivos procesos. Las fórmulas que se requieren para estimar los parámetros, que se utilizan en los diferentes procedimientos son:

$$Disponibilidad\ Operacional = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}'}$$

donde sus parámetros $MTBM$ y $\overline{M}'$, que corresponden a Confiabilidad y mantenibilidad respectivamente, se calculan mediante las respectivas expresiones:

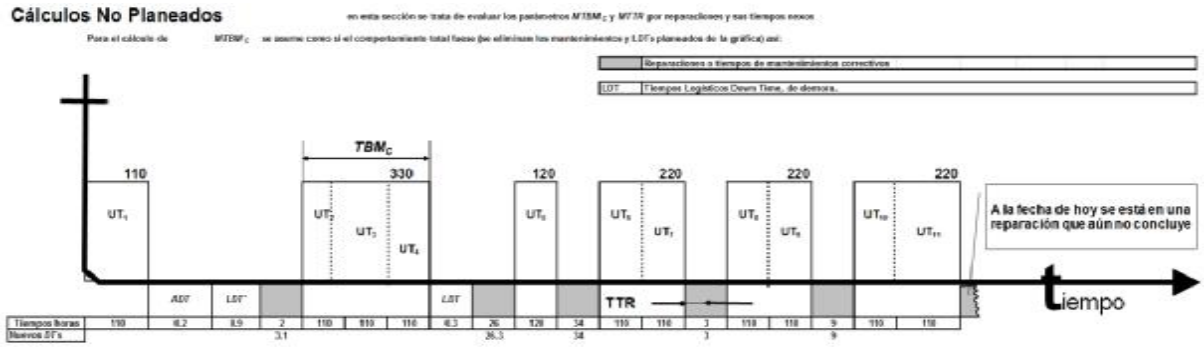
$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

y

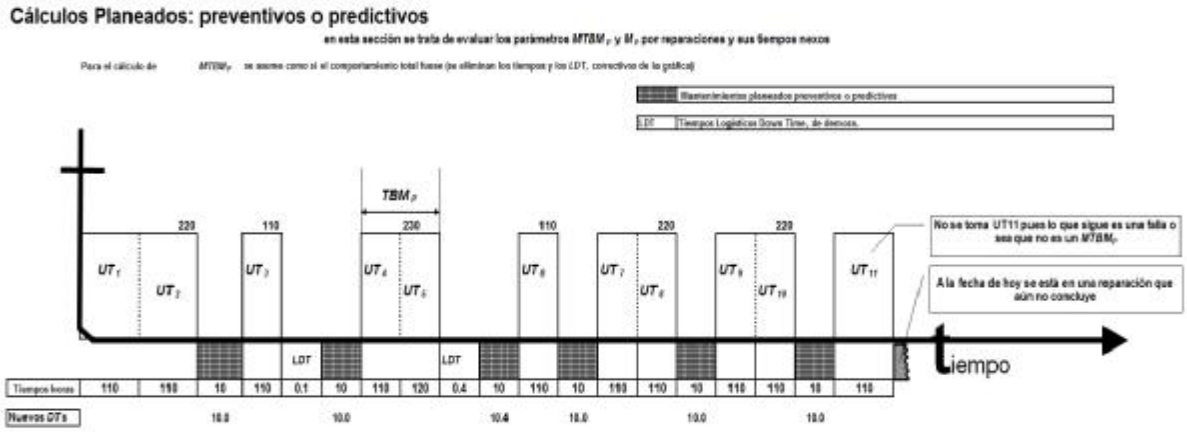
$$\overline{M}' = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

Para la estimación de $MTBM_C$ y $MTTR$ se usa el mapa No Planeado (acciones correctivas y modificativas) y para $MTBM_P$ y M_P, se utiliza el mapa Planeado.

Mapa No Planeado



Mapa Planeado



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Los diferentes $MTBM_C$, $MTBM_P$, $MTTR$ y M_P se estiman por los cuatro métodos de alineación y se toman los valores críticos (los más altos, *F(t)* y *M(t)* de i-kaésimo para valores inferiores o iguales al 50% y para los mayores se trabaja con Tabla de Rango de Medianas), de la siguiente manera:

Método con distribuciones

No Confiabilidad - No Planeada

Diferentes métodos

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas $MTBM_C$	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	Método i-kaésimo $F(t) = \frac{j}{N+1}$	*F(t)* con Aproximación Rango Mediana Tabla	*F(t)* redondeado con aproximación Rango Medianas Benard	F(t) - Kaplan & Meier
1	110	110	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	330	120	28.57%	26.46%	26.56%	23.12%
3	120	220	42.86%	42.14%	42.19%	36.64%
4	220	220	57.14%	57.86%	57.81%	51.60%
5	220	220	71.43%	73.56%	73.44%	68.10%
6	220	330	85.71%	89.09%	89.06%	86.25%
		Media	50.00%	50.00%	50.00%	46.11%

No Confiabilidad - No Planeada

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas $MTBM_C$	F(t) con Valores más altos
1	110	14.29%
2	120	28.57%
3	220	42.86%
4	220	57.86%
5	220	73.56%
6	330	89.09%

Dato No.	Transformada *F(t)*
1	14.29%
2	28.57%
3	73.56%
4	89.09%

Mantenibilidad - No Planeada

Diferentes métodos

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas *MTTR*	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	Método i-kaésimo $M(t) = \frac{j}{N+1}$	*M(t)* con Aproximación Rango Mediana Tabla	*M(t)* redondeado con aproximación Rango Medianas Benard	*M(t)* - Kaplan & Meier
1	3.10	3.1	16.67%	12.96%	12.96%	12.96%
2	26.30	3.0	33.33%	31.38%	31.48%	27.67%
3	34.00	9.0	50.00%	50.00%	50.00%	44.29%
4	3.00	26.3	66.67%	68.62%	68.52%	62.97%
5	9.00	34.0	83.33%	87.06%	87.04%	83.91%
		Media	50.00%	50.00%	50.00%	46.36%

Mantenibilidad - No Planeada

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas *MTTR*	*M(t)* con Valores más altos
1	3	16.67%
2	3	33.33%
3	9	50.00%
4	26	68.62%
5	34	87.06%

Dato No.	Transformada *M(t)*
1	16.67%
2	33.33%
3	50.00%
4	68.62%
5	87.06%

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Método con distribuciones

No Confiabilidad - Planeada

Diferentes métodos

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas $MTBM_P$	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	Método i-kaésimo $F(t) = \frac{j}{N+1}$	*F(t)* con Aproximación Rango Mediana Tabla	*F(t)* redondeado con aproximación Rango Medianas Benard	*F(t)* - Kaplan & Meier
1	220	110	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	110	110	28.57%	26.46%	26.56%	23.12%
3	230	220	42.86%	42.14%	42.19%	36.64%
4	110	220	57.14%	57.86%	57.81%	51.60%
5	220	220	71.43%	73.56%	73.44%	68.10%
6	220	230	85.71%	89.09%	89.06%	86.25%
		Media	50.00%	50.00%	50.00%	46.11%

No Confiabilidad - No Planeada

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas $MTBM_P$	F(t) con Valores más altos
1	110	14.29%
2	110	28.57%
3	220	42.86%
4	220	57.86%
5	220	73.56%
6	230	89.09%

Dato No.	Transformada *F(t)*
1	28.57%
2	73.56%
3	89.09%

Mantenibilidad - Planeada

Diferentes métodos

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas M_P	Datos de operación sin fallas Ordenados de menor a mayor	Método i-kaésimo $M(t) = \frac{j}{N+1}$	*M(t)* con Aproximación Rango Mediana Tabla	*M(t)* redondeado con aproximación Rango Medianas Benard	*M(t)* - Kaplan & Meier
1	10.00	10.0	14.29%	10.91%	10.94%	10.94%
2	10.10	10.0	28.57%	26.46%	26.56%	23.12%
3	10.40	10.0	42.86%	42.14%	42.19%	36.64%
4	10.00	10.0	57.14%	57.86%	57.81%	51.60%
5	10.00	10.1	71.43%	73.56%	73.44%	68.10%
6	10.00	10.4	85.71%	89.09%	89.06%	86.25%
		Media	50.00%	50.00%	50.00%	46.11%

Mantenibilidad - No Planeada

No. Dato	Datos de operación sin fallas en horas M_P	*M(t)* con Valores más altos
1	10.0	14.29%
2	10.0	28.57%
3	10.0	42.86%
4	10.0	57.86%
5	10.1	73.56%
6	10.4	89.09%

Dato No.	Transformada *M(t)*
1	57.86%
2	73.56%
3	89.09%

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

El segundo paso es la alineación mediante el método de mínimos cuadrados - regresión tanto para F(t) como para M(t)

Transformaciones en No Planeado

Weibull - No confiabilidad - Alineación

No Confiabilidad

Pruebas y cálculos de regresión

	j	t_j	$F(t_j)$	Ln(Ln(1/(1-F(t)))) - Y de la regresion	Ln(t_j) de datos - X de la regresion	$X_j * Y_j$	X_j^2	$\hat{Y}_j$	$\lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert$	$\lvert X_j - \bar{X} \rvert$	$[X_j - \bar{X}]^2$	$(X_j - \bar{X})*(Y_j - \bar{Y})$	$\lvert Y_j - \bar{Y} \rvert$	$[Y_j - \bar{Y}]^2$	$[Y_j - \hat{Y}_j]^2$
	1	110	14.29%	-1.86982	4.700	-8.7891	22.0945	-1.5442	-0.3256	-0.4697	0.2206	0.6577	-1.4003	1.9608	0.1060
	2	120	28.57%	-1.08924	4.787	-5.2147	22.9201	-1.3452	0.2559	-0.3827	0.1464	0.2371	-0.6197	0.3840	0.0655
	3	220	73.56%	0.28540	5.394	1.5393	29.0912	0.0417	0.2437	0.2235	0.0499	0.1687	0.7549	0.5699	0.0594
N =	4	330	89.09%	0.79547	5.799	4.6130	33.6295	0.9695	-0.1740	0.6289	0.3955	0.7956	1.2650	1.6003	0.0303
					Suma	-7.8514	107.7353	-1.8782	0.0000	0.0000	0.8125	1.8591	0.0000	4.5150	0.2611

$\bar{Y}$	-0.46955	$\bar{X}$	5.170
Pendiente	$b = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} X_j * Y_j - N * \bar{X} * \bar{Y}}{\sum_{j=1}^{N} X_j^2 - N * \bar{X}^2} =$		2.2881
Intercepto	$a = \bar{Y} - b * \bar{X} =$		-12.2994

$Ajuste = \sum \lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert =$	0.000	Ajuste
$S_e = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} =$	0.3613	Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico
$r^2 = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \bar{Y}_j)^2} =$	0.9422	Coeficiente de Determinación Muestral

Coeficiente de determinación muestral r^2 ajustado	0.9132
r^2 ajustado debe ser mayor a 0.90	

Coeficiente de Correlación Múltiple

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \bar{X}) * (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \bar{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9706$$

Parametro de forma βeta	$beta = Pendiente = b$	2.2881
Parametro de Escala Eta η	$h = e^{\left[-\frac{a}{b\,eta}\right]} = e^{\left[-\frac{Intersección}{Pendiente}\right]} =$	216.023459
$MTBM_C$	h * Gamma G (1+ 1/b) =	191.37 Horas

Se observa que la alineación cumple bien las pruebas de ajuste (0), coeficiente de determinación (mayor a 0.9025) y coeficiente de correlación (mayor a 0.95)

Prueba de Kolmogórov-Smirnov	CUMPLE	Las pruebas de bondad de ajuste se realizan con programa CMD integral en CD software
Prueba de Anderson-Darling	CUMPLE	
Prueba de Ji² Chi cuadrado	CUMPLE	

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Weibull - Mantenibilidad - Alineación - Con distribución

No Planeado

Mantenibilidad

Pruebas y cálculos de regresión

i	t_i	$M(t_i)$	Ln(Ln[1/(1-M(t_i))]) = Y en la regresión	Ln(t_i) de datos - X de la regresión	$X_i \cdot Y_i$	X_i^2	$\hat{Y}_i$	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
1	5.00	18.00%	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
2	9.00	33.33%	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
3	23.00	60.00%	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
4	31.00	68.00%	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
k = 5	51.00	87.00%	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
				Suma	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

	[illegible]	[illegible]
Pendiente	[illegible]	[illegible]
Intercepto	[illegible]	[illegible]

[illegible]	[illegible]	Sigma
[illegible]	0.3823	Desviación Estándar del Parámetro Característico Beta/Eta
[illegible]	0.3885	Coeficiente de Determinación

Coeficiente de determinación (Muestra Pequeña)	0.3487
[illegible]	

Coeficiente de Correlación Múltiple

[illegible] = 0.9416

Parámetro de forma (beta)	[illegible]	1.5235
Parámetro de Escala (Eta)	[illegible]	55.5520134
MTTR	[illegible]	28.02

[illegible]

Prueba de Kolmogorov-Smirnov	CUMPLE
Prueba de Anderson Darling	CUMPLE
Prueba de Ji Cuadrada	CUMPLE

[illegible]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

El segundo paso es la alineación mediante el método de mínimos cuadrados - regresión tanto para F(t) como para M(t)

Transformaciones en Mantenimientos Planeados

Weibull - No confiabilidad - Alineación

No Confiabilidad

Pruebas y cálculos de regresión

	j	t_j	$F(t_j)$	Ln(Ln(1/(1-F(t)))) - Y de la regresion	Ln(t_j) de datos - X de la regresion	$X_j * Y_j$	X_j^2	$\hat{Y}_j$	$\lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert$	$\lvert X_j - \overline{X} \rvert$	$[X_j - \overline{X}]^2$	$(X_j - \overline{X})*(Y_j - \overline{Y})$	$\lvert Y_j - \overline{Y} \rvert$	$[Y_j - \overline{Y}]^2$	$[Y_j - \hat{Y}_j]^2$
	1	110	28.57%	-1.08924	4.700	-5.1199	22.0945	-1.1019	0.0127	-0.4769	0.2274	0.5181	-1.0865	1.1804	0.0002
	2	220	73.56%	0.28540	5.394	1.5393	29.0912	0.4955	-0.2101	0.2162	0.0468	0.0623	0.2882	0.0831	0.0442
N =	3	230	89.09%	0.79547	5.438	4.3258	29.5727	0.5980	0.1975	0.2607	0.0680	0.2081	0.7983	0.6372	0.0390
					Suma	0.7452	80.7584	-0.0084	0.0000	0.0000	0.3422	0.7886	0.0000	1.9007	0.0833

$\overline{Y}$	-0.00279	$\overline{X}$	5.177

Pendiente	$b = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} X_j * Y_j - N * \overline{X} * \overline{Y}}{\sum_{j=1}^{N} X_j^2 - N * \overline{X}^2} =$	2.3046
Intercepto	$a = \overline{Y} - b * \overline{X} =$	-11.9348

$Ajuste = \sum \lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert =$	0.000	Ajuste
$S_e = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} =$	0.2887	Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico
$r^2 = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y_j})^2} =$	0.9562	Coeficiente de Determinación Muestral

Coeficiente de determinación muestral r^2 ajustado	0.9123
r^2 ajustado debe ser mayor a 0.90	

Coeficiente de Correlación Múltiple

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X}) * (Y_j - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y})^2}} = 0.9778$$

Parametro de forma βeta	$b\ eta = Pendiente = b$	2.3046
Parametro de Escala Eta η	$h = e^{\left[-\frac{a}{beta}\right]} = e^{\left[-\frac{Inter\ sec\ ción}{Pendiente}\right]} =$	177.435285
$MTBM_P$	h * Gamma G (1+ 1/b) =	157.20

Horas

Se observa que la alineación cumple bien las pruebas de ajuste (0), coeficiente de determinación (mayor a 0.9025) y coeficiente de correlación (mayor a 0.95)

Prueba de Kolmogórov-Smirnov	CUMPLE	Las pruebas de bondad de ajuste se realizan con programa CMD integral en CD software
Prueba de Anderson-Darling	CUMPLE	
Prueba de Ji^2 Chi cuadrado	CUMPLE	

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Weibull - Mantenibilidad - Alineación - Planeada

Mantenibilidad

Pruebas y cálculos de regresión

	j	t_j	$M(t_j)$	Ln(Ln(1/(1-M(t)))) - Y de la regresion	Ln(t_j) de datos - X de la regresion	$X_j * Y_j$	X_j^2	$\hat{Y}_j$	$\lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert$	$\lvert X_j - \bar{X} \rvert$	$[X_j - \bar{X}]^2$	$(X_j - \bar{X})*(Y_j - \bar{Y})$	$\lvert Y_j - \bar{Y} \rvert$	$[Y_j - \bar{Y}]^2$	$[Y_j - \hat{Y}_j]^2$
	1	10.00	57.86%	-0.14598	2.303	-0.3361	5.3019	-0.0574	-0.0886	-0.0164	0.0003	0.0075	-0.4576	0.2094	0.0079
	2	10.10	73.56%	0.28540	2.313	0.6600	5.3478	0.1666	0.1188	-0.0064	0.0000	0.0002	-0.0262	0.0007	0.0141
N =	3	10.40	89.09%	0.79547	2.342	1.8628	5.4841	0.8256	-0.0301	0.0228	0.0005	0.0110	0.4838	0.2341	0.0009
					Suma	2.1867	16.1338	0.9349	0.0000	0.0000	0.0008	0.0187	0.0000	0.4442	0.0229

$\bar{Y}$	0.31163	$\bar{X}$	2.319

Pendiente	$b = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} X_j * Y_j - N * \bar{X} * \bar{Y}}{\sum_{j=1}^{N} X_j^2 - N * \bar{X}^2} =$	22.5126
Intercepto	$a = \bar{Y} - b * \bar{X} =$	-51.8945

$Ajuste = \sum \lvert Y_j - \hat{Y}_j \rvert =$	0.000	Ajuste
$S_e = \sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} =$	0.1512	Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico
$r^2 = 1 - \dfrac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \bar{Y}_j)^2} =$	0.9485	Coeficiente de Determinación Muestral

Coeficiente de determinación muestral r^2 ajustado	0.8971
r^2 ajustado debe ser mayor a 0.90	

Coeficiente de Correlación Múltiple

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \bar{X}) * (Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \bar{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (Y_j - \bar{Y})^2}} = 0.9739$$

Parametro de forma βeta	$beta = Pendiente = b$	22.5126
Parametro de Escala Eta η	$h = e^{\left[-\frac{a}{beta}\right]} = e^{\left[-\frac{Intersección}{Pendiente}\right]} =$	10.0255113
M_P	h * Gamma G (1+ 1/b) =	9.79

Se observa que la alineación cumple bien las pruebas de ajuste (0), coeficiente de determinación (mayor a 0.9025) y coeficiente de correlación (mayor a 0.95)

Prueba de Kolmogórov-Smirnov	CUMPLE	Las pruebas de bondad de ajuste se realizan con programa CMD integral en CD software
Prueba de Anderson-Darling	CUMPLE	
Prueba de Ji2 Chi cuadrado	CUMPLE	

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Resultados obtenidos con distribuciones

Valores No Planeados

Reparaciones

Parametro de forma βeta	2.2881	Parametro de forma βeta	0.8288
Parametro de Escala Eta η	216.0235	Parametro de Escala Eta η	25.3399
$MTBM_C$	191.37	$MTTR$	28.02
$MTBM_C$ puntual	203.33	$MTTR$ puntual	15.08

Valores Planeados

Mantenimientos preventivos y/o predictivos

Parametro de forma βeta	2.3046	Parametro de forma βeta	22.5126
Parametro de Escala Eta η	177.4353	Parametro de Escala Eta η	10.0255
$MTBM_P$	157.20	M_P	9.79
$MTBM_P$ puntual	185.00	M_P puntual	10.10

MTBM	***86.30***
M´	***18.01***
D_O	***82.74%***

$$\overline{M'} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} = \frac{\frac{28.02}{191.37} + \frac{9.79}{157.20}}{\frac{1}{191.37} + \frac{1}{157.20}} = 18.01 \ horas$$

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_C} + \frac{1}{MTBM_P}} = \frac{1}{\frac{1}{191.37} + \frac{1}{157.20}} = 86.30 \ horas$$

$$Disponibilidad\ Operacional = A_O = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M'}} = \frac{86.30}{86.30 + 18.01} = 82.74\ \%$$

Con estimaciones puntuales se consigue:

$$\overline{M'} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_P}{MTBM_P}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_P}} = \frac{\frac{15.1}{203.3} + \frac{10.1}{185}}{\frac{1}{203.3} + \frac{1}{185}} = 12.48$$

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_C} + \frac{1}{MTBM_P}} = \frac{1}{\frac{1}{203.3} + \frac{1}{185}} = 96.86$$

$$Disponibilidad\ Operacional = A_O = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M'}} = \frac{96.86}{96.86 + 12.48} = 88.59\ \%$$

En comparación con los valores puntuales obtenidos (que no deben usarse, porque pueden existir varias curvas de fiabilidad y de mantenibilidad con los mismos *MTBF* y *MTTR* respectivamente, como se explica en secciones anteriores); se observa que el *MTBM* es menor[177] con distribución, al igual se denota un $\overline{M'}$ mayor[178] con distribución, en ambos casos se vuelve más estricto con distribución, lo que puede ser debido a asumir valores

[177] *Al ser menor es más crítico pues se asume que el sistema trabaja menos tiempo entre fallas.*
[178] *Cuando es mayor es más crítico, pues se asume que entre más tiempo tome la reparación o el mantenimiento se hace más riguroso el cálculo.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

más críticos en los $F(t_j)$ y de $M(t_j)$ en los valores repetidos de *UT* y *DT*, por un lado y, por el otro que los diferentes procesos matemáticos y estadísticos realizados, hacen más severo el proceso de cálculo.

En todos los eventos de este ejercicio, es más conservador trabajar con distribuciones frente a la opción de cálculos puntuales.

Al aplicar en la vida real las expresiones para estimar A_O, se debe tener en cuenta que el *MTBM* debe ser mucho más grande que $\overline{M}'$ (al menos unas 10 veces), (en el ejemplo resuelto es igual a 86.30 / 18.01 o sea que es 4.79 veces mayor (se debe recordar que es simplemente un ejemplo y por eso no cumple con todo lo debido, pues no hay muchos eventos registrados, dado que no cabrían en las figuras)), también se debe evaluar un período lo suficientemente largo de tal forma que el tiempo total de análisis de eventos sea al menos 10 veces el $\overline{M}'$ (en el ejemplo resuelto es 1355.9 horas de análisis total / tiempo medio entre reparaciones y mantenimientos planeados de 18.01 horas, lo que da 75.28 veces), como también que para tener soporte estadístico en cada uno de los cuatro cálculos haya al menos treinta y un eventos[179].

Es importante resaltar que como las diferentes pruebas de bondad de ajuste dan correctas[180] en los cuatro casos, no es necesario recurrir a otras distribuciones[181], ni al *MLE*, aparte de que cada una de las pruebas estadísticas de alineación (ajuste, error típico, coeficiente de correlación, coeficiente de determinación muestral normal y ajustado) en general dan aceptables en los cuatro casos (No Planeado (No Confiabilidad y Mantenibilidad) y Planeado (No Confiabilidad y Mantenibilidad)).

4.4 Comportamiento futuro - Nuevos cálculos

Los valores que se hallan de $MTBM_C$, $MTBM_P$, *MTBM*, *MTTR*, M_P y $\overline{M}'$, permiten construir el futuro cercano que ocurre con el componente analizado, se recomienda estimar hasta un 10% del tiempo evaluado y calculado, como máximo.

La forma de estimar el futuro cercano simulado, se hace con base en los tiempos entre reparaciones y mantenimientos obtenidos, su cómputo es sencillo en Excel o en otro medio informático, respetando el evento que se dé primero si una reparación (correctiva o modificativa) o un mantenimiento planeado (preventivo o correctivo).

Se debe tener en cuenta que cualquier evento nuevo que ocurra, trátese de un *UT*, de un *TTR* o de M_P puede cambiar significativamente los valores de los parámetros $MTBM_C$, $MTBM_P$, *MTTR* o M_P estimados en el cálculo previo anterior, como también puede variar los βetas, Etas, *MTBF* o *MTTR*, lo que significa estar ante una situación muy diferente, que requiere nuevas estimaciones futuras de corto plazo.

Se recomienda hacer nuevos cálculos cada vez que ocurre un nuevo evento o ciclo que incluya al menos un *UT*, un *MTTR* y un M_P, o cada vez que se incremente el tiempo estudiado al menos en un diez por ciento. En el ejercicio que se desarrolla por ejemplo se sugiere hacer la nueva evaluación cuando se complete un tiempo mínimo de 1491 horas (1355.99 más el 10% de 135.59 horas).

Algunas empresas avanzadas en el tema prefieren desarrollar paquetes informáticos[182] que calculen siempre en tiempo real, que en definitiva es lo más recomendable, aunque todo depende de las necesidades en particular o de los recursos que se dispongan.

---

[179] *Véase Teorema del límite central (Levin, 1996) donde el autor Levin, manifiesta y demuestra la bondad estadística de tener tamaños muestrales superiores a treinta y un elementos.*

[180] *Debe recordarse que para una correcta aplicación de Ji2 Chi cuadrado, se deben tener al menos cinco datos o muchos más, lo que pone de manifiesto que en este caso del ejercicio cumplen, pero no es una ortodoxa aplicación.*

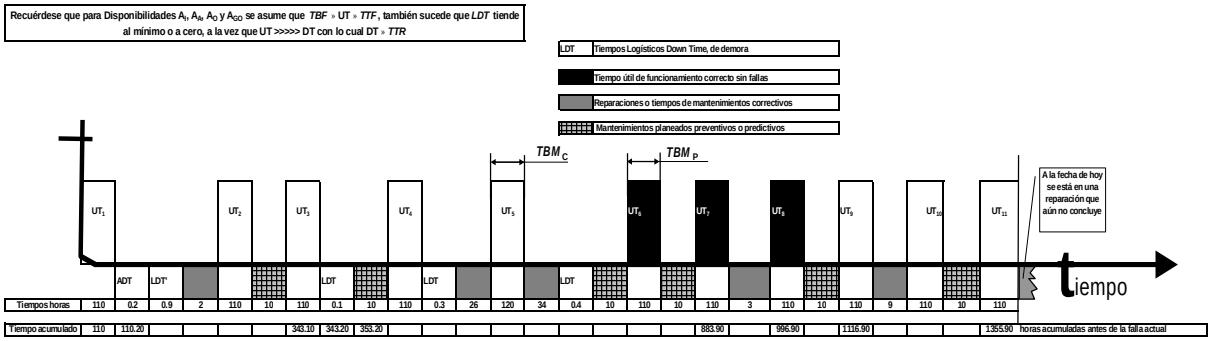
[181] *En el evento de que algunas de las pruebas de bondad de ajuste no cumplan, se recomienda en este caso particular chequear con distribución normal, ya que en ambos casos* $MTBM_C$ *y* $MTBM_P$ *dan por encima de 2.05 .*

[182] *O de apoyo al sistema informático global de la empresa, es el caso de la Empresa ISAGEN, generadora de energía eléctrica donde el autor colaboró en la implementación de un sistema paralelo al SAP de la compañía, para hacer estimaciones en tiempo real (Pachón y otros,2003).*

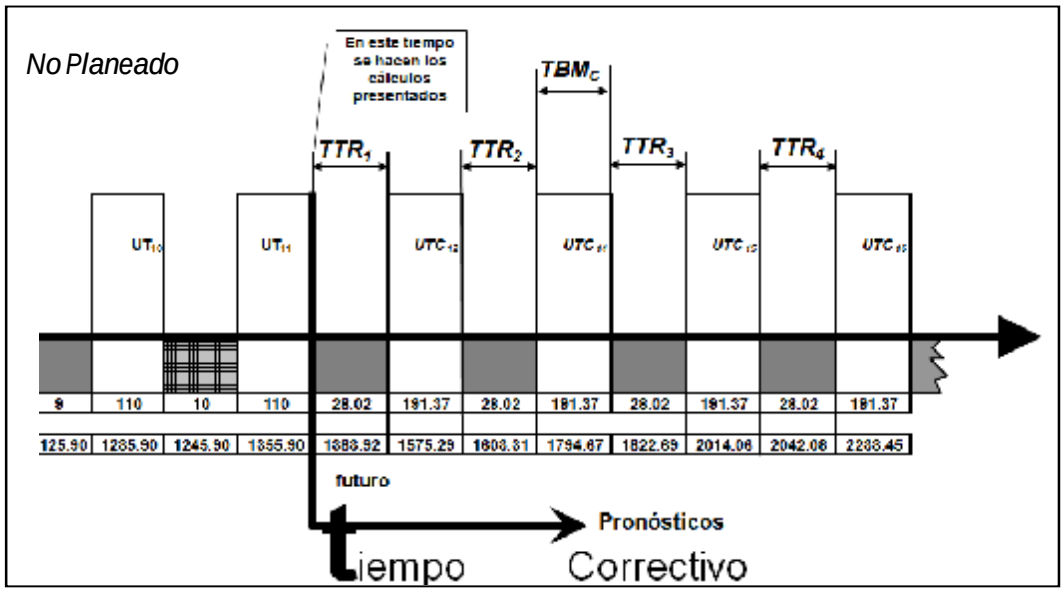
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

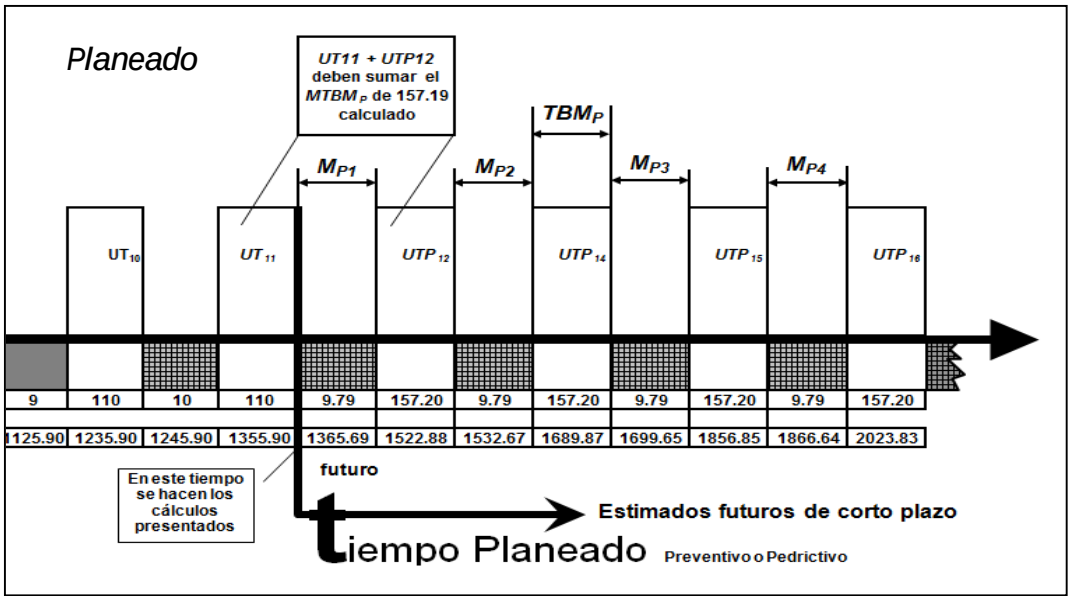
Ejemplo 28 - Simulación de corto plazo en la Disponibilidad Operacional (cálculos con distribuciones)

Situación actual hasta el cálculo o estimación de parámetros (Hora 1355.9)



Situación futura teniendo en cuenta las acciones correctivas y los mantenimientos planeados, que se espera ocurran en el futuro de corto plazo (estimaciones correctivas y planeadas respectivamente).



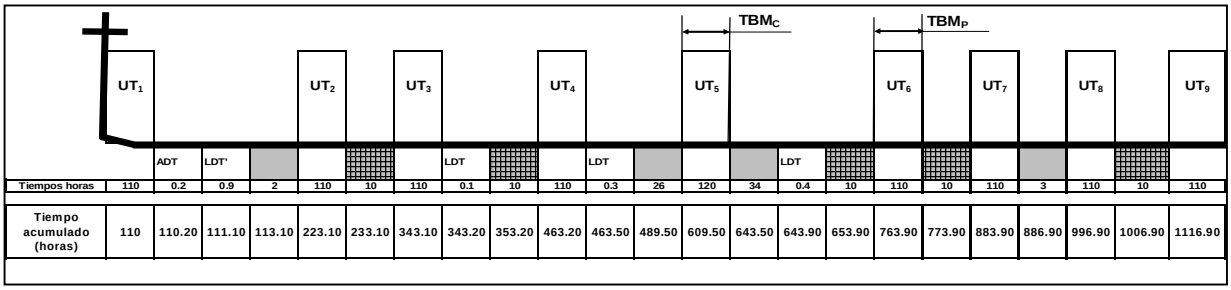


PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

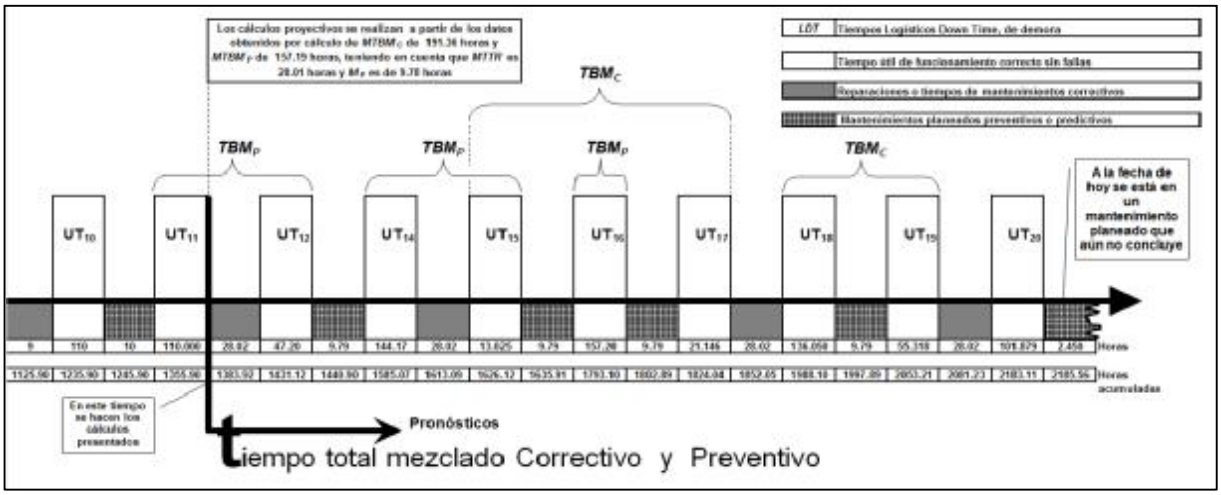
El comportamiento futuro de corto plazo, simulado que se obtiene al conjugar ambas situaciones (reparaciones y mantenimientos planeados), se visualiza en:

LDT	**Tiempos Logísticos Down Time, de demora**
	Tiempo útil de funcionamiento correcto sin fallas
	Reparaciones o tiempos de mantenimientos correctivos
	Mantenimientos planeados preventivos o predictivos

Tiempos que ya han transcurrido:



Pronósticos de los eventos que ocurren a futuro:



La gran ventaja de poseer el estimado, es que todo se puede planear con mayor anticipación y se ahorran grandes sumas de dinero en la preparación de las actividades por parte de mantenimiento. Para producción es más importante todavía, pues puede saber con antelación los tiempos en que tendrá una disponibilidad estimada para realizar su actividad de generar bienes o servicios con el sistema o máquina analizado.

4.5 Estrategias y acciones derivadas del CMD - Análisis de confiabilidad – βeta

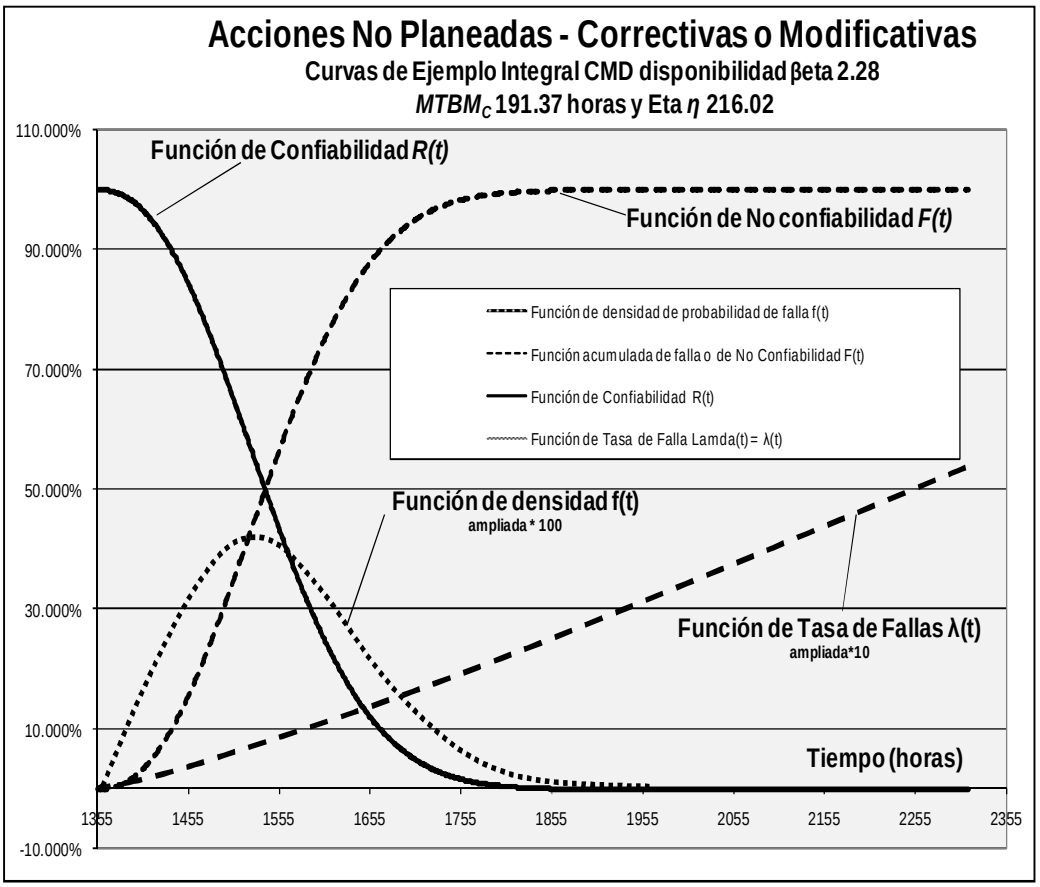
Los valores calculados en confiabilidad, tanto para la fase de reparaciones $MTBM_C$ como para la sección de mantenimientos planeados (preventivos o predictivos) $MTBM_P$ dan βetas cercanos a 2.30, lo que ubica el ejercicio al inicio de la etapa 3 de la Fase III, donde la función de densidad empieza un ciclo de reparaciones y mantenimientos planeados con distribución normal, y una tasa de fallas creciente.

4.5.1 Análisis de la confiabilidad influenciada por reparaciones futuras estimadas de corto plazo

Para el $MTBM_C$, o sea el comportamiento debido a fallas y reparaciones:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 68 - Curvas de función de densidad, confiabilidad, tasa de fallas y no confiabilidad en confiabilidad correctiva en el ejercicio integral A_O



(Mora, 2007b)

Se desprende de la gráfica que la función de densidad o de falla instantánea asume una distribución normal donde se incrementa en cada avance del tiempo la probabilidad de que aparezca una nueva falla, hasta llegar a un tope que sucede en la media de la distribución, exactamente en el punto 1523.99 horas, donde alcanza la función instantánea su máximo valor, de allí en adelante empieza a disminuir paulatinamente el valor *f(t)*, demostrando que el sistema ha fallado suficientes veces y que cada vez será menor la probabilidad instantánea de falla nueva.

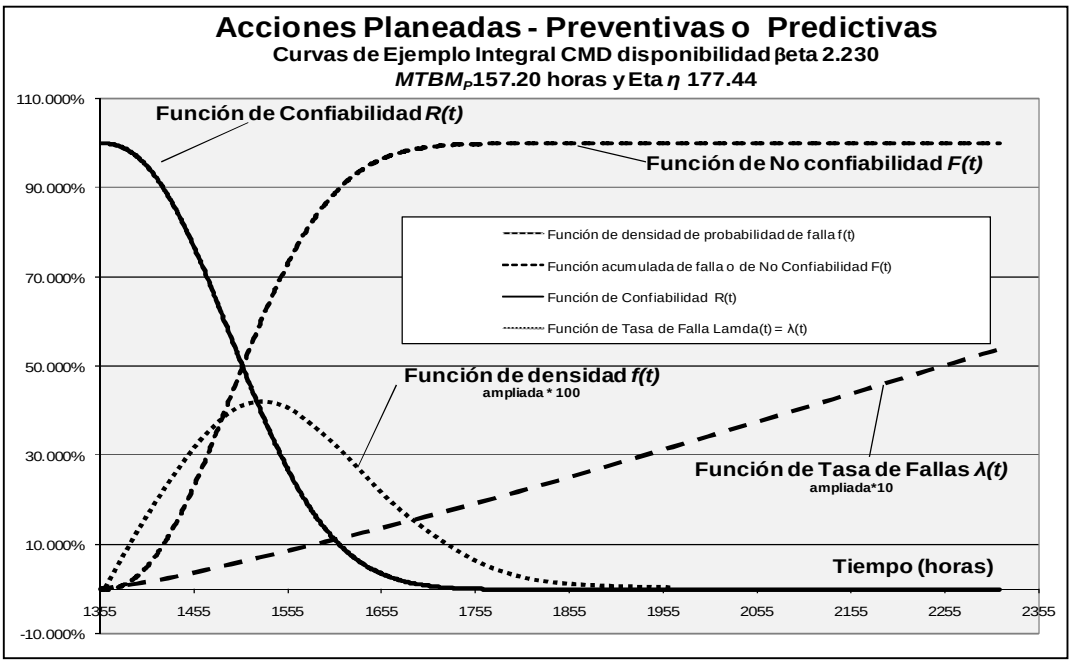
La rata de fallas, Tasa de Fallas *l(t)* o función de riesgos, empieza a incrementarse en forma constante y luego aceleradamente hacia la derecha, siendo esto muy característico del final de la etapa 2 e inicio de la etapa 3 de la Fase III en la curva de Davies, lo que pone de manifiesto que la rata con que aumenta Lambda *(t)* es una compensación entre la variación de función de densidad y la confiabilidad; por su lado la confiabilidad disminuye significativamente en la medida que aumenta el tiempo.

4.5.2 Análisis de la confiabilidad influenciada por los mantenimientos planeados futuros estimados de corto plazo

Para el $MTBM_P$, o sea el comportamiento debido a mantenimientos planeados y su influencia en la confiabilidad:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 69 - Curvas de función de densidad, confiabilidad, tasa de fallas y no confiabilidad en mantenimientos planeados en el ejercicio integral



(Mora, 2007b)

De forma casual, lo mismo que sucede en la función de densidad para las fallas debidas a reparaciones es muy similar a los hechos que suceden en la confiabilidad influenciada por los mantenimientos planeados; la *f(t)* crece gradualmente hasta alcanzar el máximo valor en la media de la distribución normal en el punto 1494.99 horas, descendiendo después de allí, por otro lado la tasa de fallas o función de riesgo crece en forma constante y luego empieza a acelerar en la medida que se incrementa el tiempo; como también sucede que la confiabilidad disminuye aceleradamente hacia la derecha al incrementarse el tiempo.

Los resultados manifiestan que las pérdidas de funcionalidad imputables a fallas que implican reparaciones son mayores que las pérdidas de producción generadas por la ejecución de mantenimientos planeados, esto es muy evidente debido a que el $MTBM_C$ es mayor que el $MTBM_P$, por esto se deben controlar o erradicar las fallas con reparaciones mediante la utilización de la técnica *FMECA* y una vez se logren reducir, aplicar una táctica *RCM* para incorporar los mantenimientos planeados que eviten esas fallas actuales a futuro.

Es evidente que el mantenimiento planeado actual no alcanza a prevenir o predecir las fallas imprevistas que ocurren, lo que corrobora la urgente necesidad de usar análisis de fallas, y luego implementar el *RCM* siempre y cuando se tenga un recurso humano motivado a ello, lo que en su defecto implica más bien un *TPM*.

Es importante señalar que las acciones correctivas debidas a reparaciones básicamente atienden componentes, mientras que los mantenimientos planeados o tareas proactivas procuran evitar fallas en las máquinas o sistemas, aunque es relevante mencionar que la acción específica preventiva o predictiva se realiza concretamente en uno o varios componentes.

La conducta de los componentes o sistemas en cada fase y etapa (véase Ilustración 42 - Curva de la bañera o de Davies), se identifica mediante:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 70 - Comportamiento en las zonas de la curva de la bañera

	Característica	Causado por	Disminuido con
Fase I - Mortalidad Infantil	La tasa de fallas disminuye paulatinamente o drásticamente con el tiempo[183]	Defectos de producción. Fallas por soldadura. Fisuras. Componentes imperfectos. Calidad defectuosa. Medio ambiente fuera de control Condiciones fuera de estándares. Ensambles inadecuados. Procesos inadecuados	Chequeo de funcionamiento. Control de Calidad Examen de aceptación FMECA o análisis de fallas Acciones correctivas buenas
Fase II - Rodaje o Vida Útil	El βeta y la tasa de fallas son fijos en valor	Mantenimiento Inadecuado. Entorno de trabajo. Cargas aleatorias. Errores humanos. Situaciones fortuitas. Eventos inesperados al azar	Rediseño de máquina o de proceso. Recurrencia. Revisión técnica de proceso u operación
Fase III - Envejecimiento o Desgaste	La tasa de fallas se incrementa de varias formas	Fatiga. Corrosión. Envejecimiento. Fricción. Cargas cíclicas. Defectos ocultos. Bajos coeficientes de seguridad	Tareas proactivas. Reemplazo de componentes Tecnología Instrumentos avanzados específicos de orden técnico de mantenimiento (véase en capítulos posteriores)

Las acciones que deben llevar a cabo se abren en dos partes: en cuanto a las acciones correctivas de reparación, nótese que se empiezan a incrementar, dado que se está al inicio de la fase creciente izquierda de la distribución normal de función de densidad o falla instantánea, esto se puede controlar mediante la erradicación o disminución de las fallas recurrentes, al utilizar la técnica *FMECA*[184] mediante la cual se eliminan o se controlan las fallas imprevistas; otro método ideal para la erradicación de fallas imprevistas (o al menos su adecuada gestión y operación) es utilizar *RCM*[185].

El hecho de que ya el equipo del ejercicio se conoce en cuanto a los tipos de fallas que presenta, permite la adecuada utilización de la táctica *RCM*, la cual se posibilita más para equipos maduros con βeta superior a 2; por el otro lado para controlar los tiempos de no funcionalidad del equipo analizado se puede utilizar el *RCM*, ya que por medio de este se controlan todos los modos de falla en cada una de las fallas funcionales que presenta.

Recuérdese que la metodología táctica *RCM* implementa tareas proactivas de mantenimientos planeados sobre las fallas potenciales que pudiesen ocurrir, al combinarlo con el *FMECA* permite entonces adecuar la estrategia adecuada ya que va incorporando las acciones de reparaciones a tareas de mantenimiento planeado rutinario en aquellos casos donde hay que seguir conviviendo con ellas.

En síntesis, esto corrobora que la mejor combinación de acciones correctivas y mantenimientos planeados, para este caso particular, consiste en la implementación de técnicas *FMECA* y táctica *RCM* para un βeta como el del ejercicio superior a 2, en fase de inicio de la etapa 3 en la fase III de la bañera.

Nótese que la táctica Proactiva es mucho más amplia que cualquiera de las demás, aparte de que contiene la Reactiva, el *TPM* y el *RCM*.

---

[183] *En la zona I, con piezas nuevas que están en contacto y, partiendo de cero, hay un rápido aumento inicial de la rata de fallas, hasta llegar a un punto de pulimento de las superficies, donde hay una inflexión de la curva y comienza a disminuir paulatina o drásticamente la tasa de fallas. Existe una influencia que puede tener un mal proceso de asentamiento de las piezas, en las etapas futuras de la vida de los elementos. Las fallas pueden deberse a un mal montaje, a una deficiente lubricación, a una deficiente operación por parte del operario, a las altas temperaturas de operación, etc. (Benítez, 2007).*

[184] *FMECA Failure Mode, Effects Causes and Criticality Analysis – Análisis de los Modos, los Efectos, las Causas y las Criticidades de las Fallas.*

[185] *RCM – Reliability Centred Maintenance – Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – Mantenimiento Basado en Confiabilidad..*

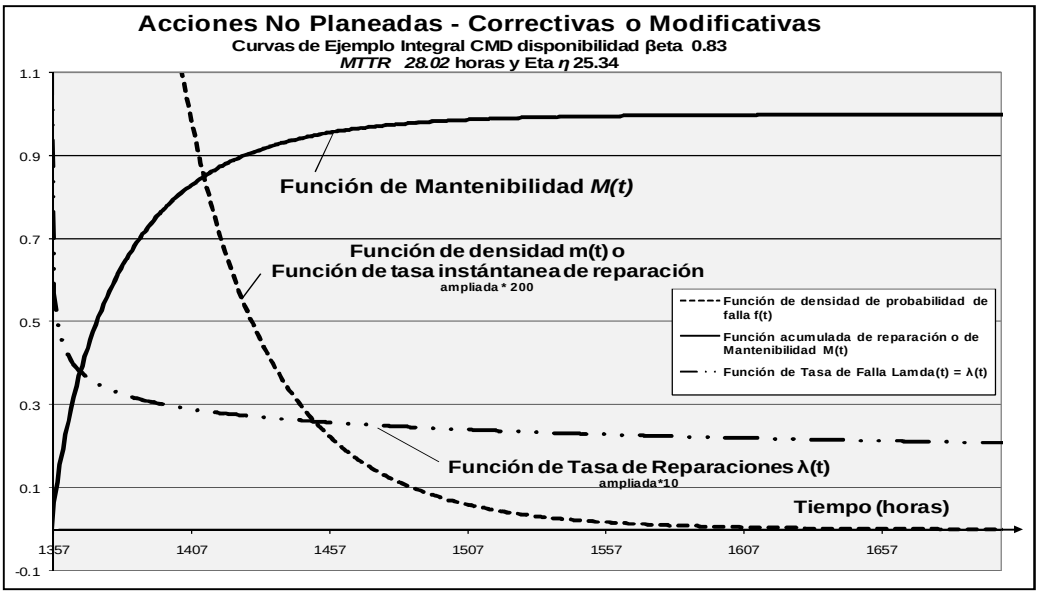
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

El βeta con valor mayor a 2.2 denota ya poca dispersión de los valores de los tiempos útiles, lo que implica que ya se tiene un buen control operativo del sistema, con lo cual se puede propender el *RCM*, pues es la etapa ideal para ello; situación esta que no se recomendaría por ejemplo para un βeta de valor cercano a 1.05 donde apenas el equipo comienza a estabilizarse en cuanto a sus tiempos útiles y tiempos de no funcionalidad, lo que implica que es mejor dedicar el tiempo al reconocimiento y aprendizaje colectivo sobre las fallas que presenta el equipo tanto por parte de producción como de mantenimiento, situación ideal para el *TPM*.

4.5.3 Análisis de la función de mantenibilidad influenciada por las reparaciones TTR estimadas en el corto plazo

En cuanto a mantenibilidad debida a las acciones correctivas se puede observar su comportamiento en la siguiente figura:

Ilustración 71 - Curvas de acciones correctivas de función de densidad, mantenibilidad y tasa de reparaciones en ejercicio integral A_O



Se puede descubrir que las fallas instantáneas van disminuyendo con el tiempo, en general se puede afirmar que cada vez duran menos, la estrategia es mantener esta política e implementar urgentemente la técnica del análisis de fallas y el *RCM* como táctica para controlarlas o erradicarlas. Al estar en la Fase I de la curva de la bañera se puede asumir que todas o al menos la mayoría de las fallas se pueden controlar o erradicar, con la metodología *FMECA*.

Las cifras hasta ahora revisadas muestran que hay más acciones correctivas que mantenimientos planeados, esto se puede minimizar constituyendo un Grupo de Ataque correctivo con las Personas de Mantenimiento y de Ingeniería de Fábricas que posean mejores competencias en las ramas de la ingeniería donde se estén presentando las fallas funcionales (derivadas del *RPN*[186] y/o del *FMECA*), de tal forma que al ser jerarquizadas se vayan eliminando o controlando gradualmente por parte de este grupo especial de ataque de mantenimiento, lo que redunda inmediatamente en grandes ahorros de mantenimiento al tener mejores confiabilidades y mantenibilidades, y por ende elevar la disponibilidad operacional de los componentes, máquinas o sistemas que se evalúan.

La tasa de fallas está en disminución lo que implica que es un buen síntoma pero se debe acompañar del análisis de fallas para disminuirla mucho más y tratar de convertir las fallas imprevistas en tareas proactivas de mantenimiento, o sea desplazarse a la derecha en la curva.

[186] *RPN – Número de Riesgo Prioritario, derivado de los tableros de Funciones, Fallas Funcionales y Modos de Falla del FMECA en el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad o RCM.*

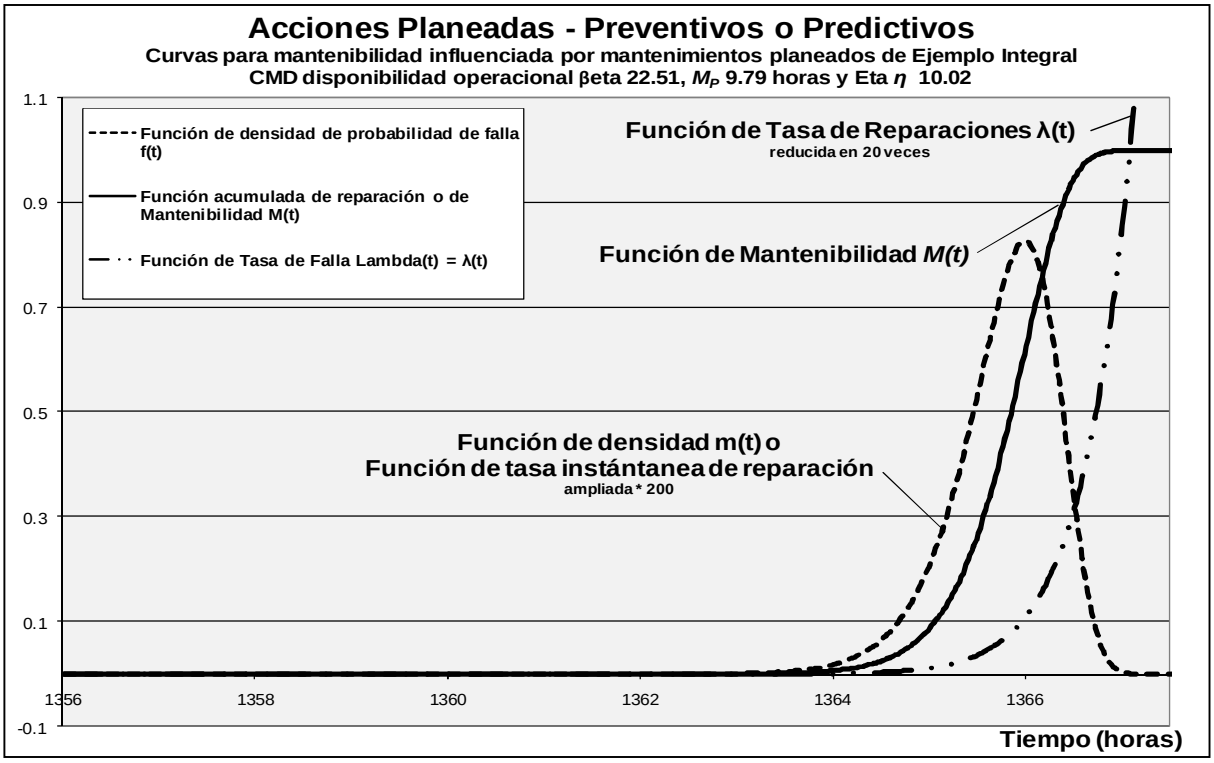
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

En cuanto a las tareas proactivas, se puede observar que están al inicio de la fase creciente de una distribución normal, lo cual implica un mejor comportamiento de estas a través del *RCM*.

4.5.4 Análisis de la mantenibilidad influenciada por las tareas proactivas planeadas estimadas en el corto plazo

Los mantenimientos planeados se derivan de las decisiones de mantenimiento y producción en la empresa en cuestión, son del control total de la compañía, se deben ir incorporando más tareas planeadas derivadas del análisis de fallas del *RCM* recomendado, esto con el fin de que con el tiempo disminuya relativamente el *MTTR* frente al M_P en el corto plazo.

Ilustración 72 - Curvas de mantenimientos planeados de función de densidad, mantenibilidad y tasa de reparaciones en ejercicio integral A_O



Se puede afirmar que existe un buen control en general de las tareas proactivas que se llevan a cabo, están bastante estandarizadas ya que su βeta se encuentra al inicio de la etapa 3 de la Fase III (para βetas superiores a 2), con lo cual se indica que existe un adecuado control de las mismas; más sin embargo al compararlas con las acciones correctivas se denota que los mantenimientos planeados no controlan totalmente las fallas imprevistas que se presentan, la recomendación estratégica es la misma: implementar a la brevedad posible el análisis de fallas e involucrar las acciones derivadas del mismo en el plan normal de mantenimiento anticipado.

La función de densidad se encuentra al inicio de una distribución normal lo que manifiesta un lento crecimiento en el tiempo para luego disminuir a la derecha cuando ya se han aplicado bastantes tareas proactivas.

También es importante mencionar que la tasa de reparaciones crece en esta zona, esto acompañado de la situación de ir incorporando más acciones planeadas que eliminen las fallas que implican reparación, conduce a pensar en reforzar más el personal de mantenimiento planeado e ir disminuyendo el personal del grupo de ataque citado anteriormente, a medida que vayan reduciendo las reparaciones y aumentando las tareas proactivas, con el fin de mantener el $\overline{M}'$ constante o que disminuya con el tiempo, para mejorar la mantenibilidad y por ende aumentar la disponibilidad del sistema.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4.5.5 Recomendaciones estratégicas de acciones y táctica para el ejercicio integral de A_O

En síntesis del ejercicio en evaluación se recomienda:

- Implementar la técnica de análisis de fallas *FMECA*, acompañada de *RCFA*[187] y *RPN*, mediante la creación de Grupos Caza-Fallas y de un Grupo de ataque que disminuya rápidamente las fallas que implican reparaciones.
- Revisar los *ADT*, los *LDT* y los *LDT*' con el fin de eliminarlos o disminuirlos a su mínima expresión.
- Convertir a la brevedad posible las reparaciones debidas a fallas imprevistas en mantenimientos planeados que conduzcan a tareas proactivas que eviten esas fallas.
- Empezar a desarrollar la táctica *RCM* como derivación de la recomendación anterior.
- Medir constantemente la proporción del $\overline{M}'$ debida a correctivo y a planeado para ver si la operación *FMECA* y la táctica *RCM* están dando frutos.
- Controlar y medir permanentemente los valores CMD para poder constatar el mejoramiento continuo de los indicadores.

4.6 Análisis histórico, presente y futuro cercano de parámetros del ejercicio integral

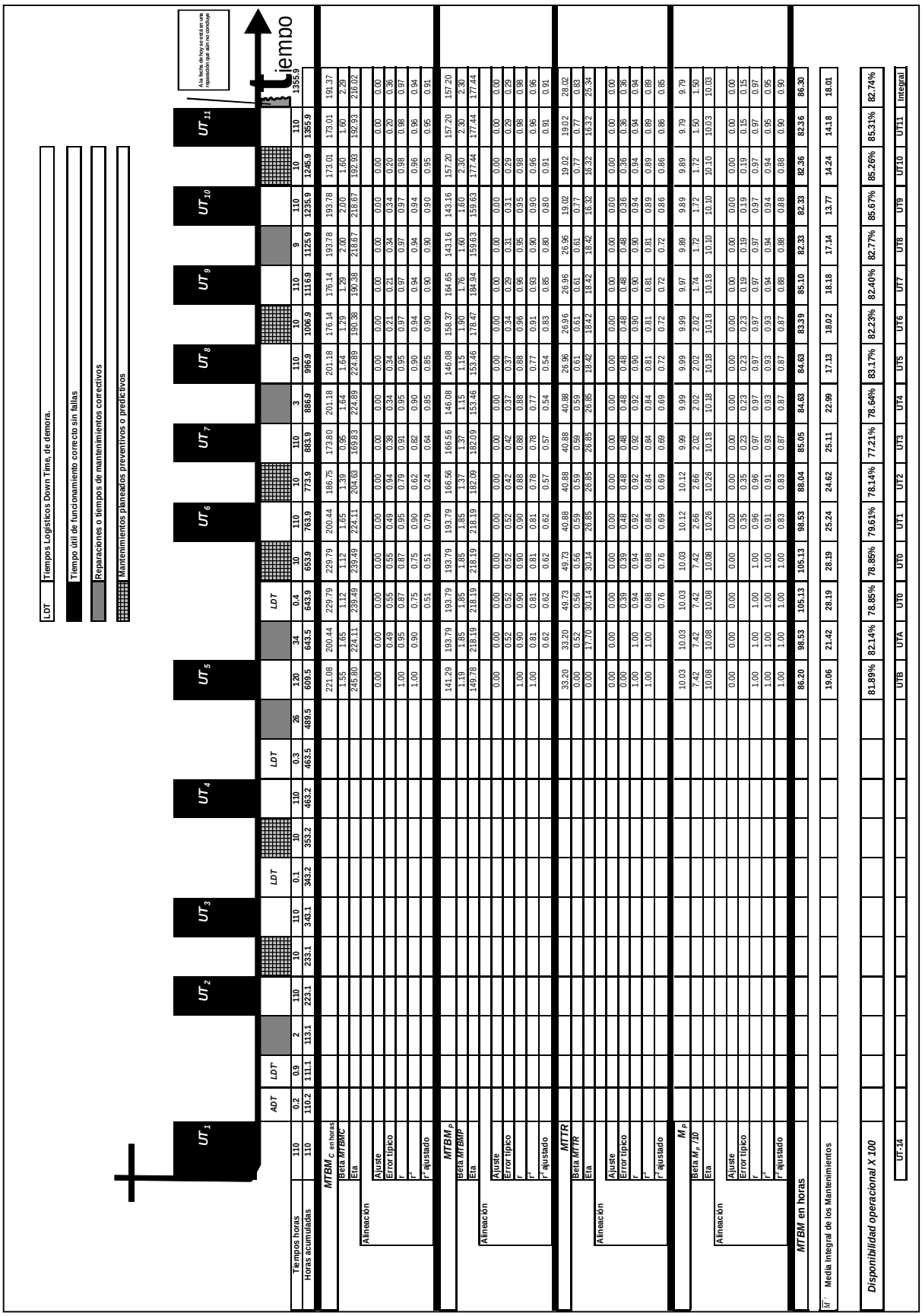
La evaluación de todos los parámetros calculados en cada uno de los eventos (fallas, reparaciones, mantenimientos planeados, tiempos de demora, tiempos logísticos, *Ready Time*, etc.) que ocurren permite identificar las directrices de cada uno de ellos y del sistema o componentes en general en el futuro cercano.

4.6.1 Estrategias y acciones futuras.

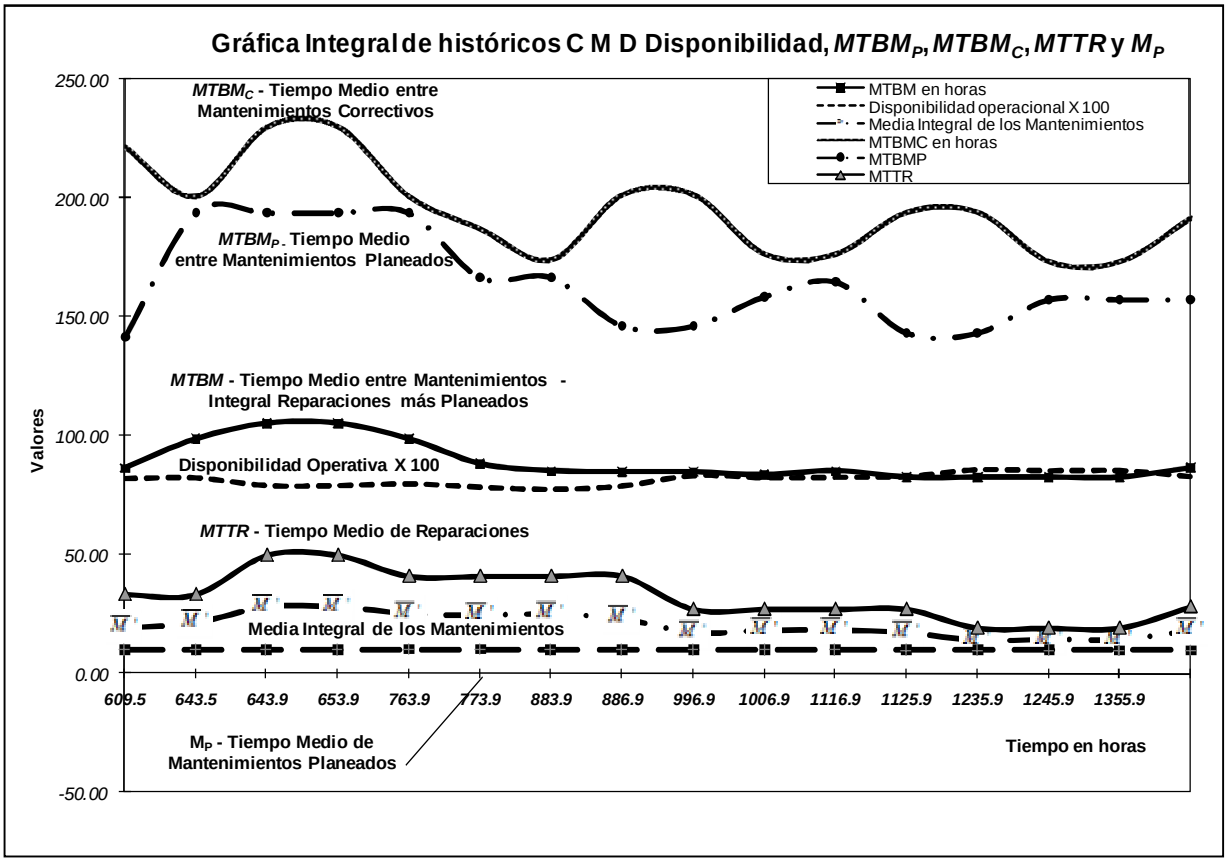
[187] *RCFA Root Cause Failure Analysis – Análisis de la Causa Raíz de las Fallas.*

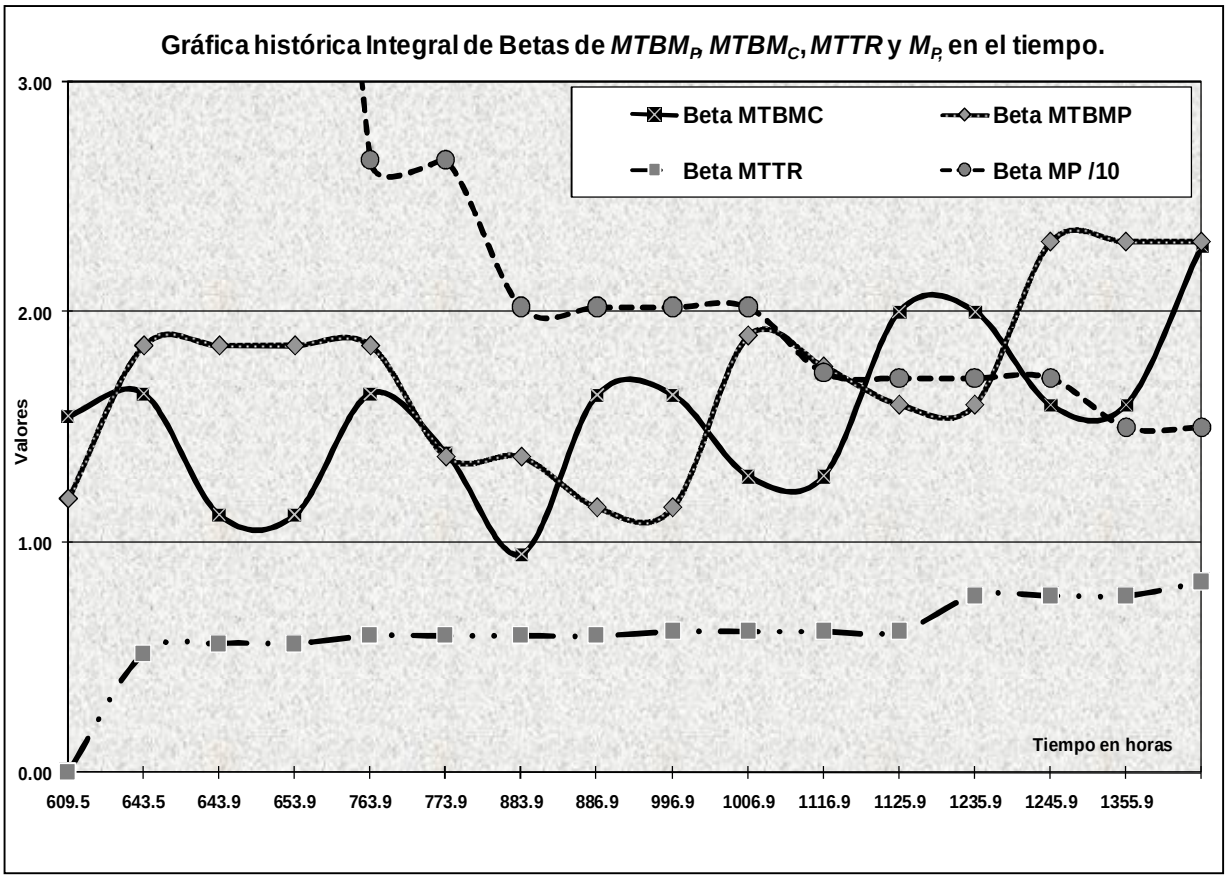
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ejemplo 29 - Detalle de cálculos en cada evento - Aplicación Integral con cálculos con distribuciones.



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com





PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Se observa en la gráfica una suave tendencia creciente de la disponibilidad. El $MTBM_C$ oscila mucho pero últimamente tiende a estabilizarse en menores valores, en este se debe aplicar el *FMECA* para poder ampliarlo a futuro. El $MTBM_P$ tiende a estabilizarse, se debe buscar que suba aplicando *RCM*.

El *MTBM* tiende también a estabilizarse con un leve crecimiento al final del período que se evalúa, se debe procurar que aumente al aplicar las técnicas de *FMECA* y *RCM* recomendadas anteriormente para reparaciones y mantenimientos planeados respectivamente.

El *MTTR* tiende a la baja, situación que es buena pero se debe procurar que descienda más con las sugerencias enunciadas. El indicador M_P se mantiene estable, es conveniente intentar aumentar la cantidad de mantenimientos planeados en sustitución de las reparaciones.

El $\overline{M}'$ tiende a la baja y en general debe procurarse mantenerlo así, pero teniendo en cuenta, las consideraciones anteriores se *FMECA* y *RCM*.

El βeta del $MTBM_C$ paulatinamente tiende a subir en un pequeño valor, esto indica que deben aplicarse las técnicas recomendadas a la etapa 3 de la Fase III de la curva de la Bañera; se aprecia igualmente que el βeta del $MTBM_P$ tiende a estabilizarse después de haber incrementado su valor, se mantienen las recomendaciones ya entregadas en párrafos anteriores.

La ventaja de mantener los βetas en los eventos de mantenimientos planeados por encima de dos, es que se estandarizan y se vuelven muy fáciles de realizar; lo que no puede decirse de los eventos de reparaciones que por el contrario al estar en la etapa 3 de la fase III de la bañera denotan que son similares y que no se controlan ni se erradican, en el peor de los casos aún teniendo fallas que impliquen tareas correctivas deben estar en la fase I donde supuestamente son diferentes y nuevos cada vez, pero debe recordarse que se deben eliminar sobre todo los recurrentes cada vez que se presenten.

Un βeta tendiendo a valores superiores a 2 en la mantenibilidad debido a tareas proactivas planeadas, significa que se están estandarizando en términos del tiempo de realización, y que son cada vez más controladas, conocidas y sencillas de realizar.

Un βeta bajo inferior a uno denota que apenas se inician las labores de mantenimiento planeado o que las diferentes cuadrillas que los realizan se demoran cantidades de tiempo significativamente diferentes para realizarlos, en este caso se debe procurar un adecuado entrenamiento del Recurso Humano que propenda la realización estandarizada en el mínimo tiempo, tratando de acercarse a valores internacionales de tiempos de reparación y de horas-hombre como los que presenta la casa OREDA en sus *Handbooks*[188] de 1992, 1997 (OREDA, 1997) y 2002 (OREDA, 2002)o a otros estándares internacionales u otras entidades mundiales similares.

4.6.2 Pronósticos de indicadores CMD de corto plazo

La metodología más recomendada para conocer el futuro cercano, es pronósticos bajo el método de series temporales, usando los modelos clásicos (de ajuste por tendencia, los de suavización (Brown, Holt, Winter, X Census 11, etc.) y los de descomposición (Winter, X11, etc.) y los modernos (Metodología Box-Jenkins y AR.I.MA.[189]), mediante el uso y el desarrollo de toda la metodología estandarizada universalmente para realizar estos pronósticos, de tal forma que se garanticen resultados con buena bondad de ajuste (*Goodness of Fit*) entre pronósticos realizados y realidad (Mora, 2007c) (Molinero@, 2004).

4.6.2.1 Pronósticos con Series Temporales

La metodología se basa netamente en el modelo científico de investigación y aplicación científica, que es lo más puro que se puede encontrar, a continuación se destacan los pasos que usa la metodología.

---

[188] *Handbooks – Manuales técnicos de información.*
[189] *AR Auto Regressive – I Integrated – MA Moving Average*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 73 - Series Temporales bajo el método científico

METODOLOGÍA UNIVERSAL DE PRONÓSTICOS	MÉTODO CIENTÍFICO
Paso 1- Análisis previo de la serie de demanda 1.1 Síntesis descriptiva 1.2 Calidad y cantidad de datos 1.3 Cumplimiento de estabilidad del entorno 1.4 Análisis previo de la serie completa 1.4.1 Estructura Vertical, determinación de Nivel 1.4.2 Estructura Horizontal, análisis de Ruido o Aleatoriedad 1.4.3 Estructura Tendencial, estimación de forma lineal y/o no lineal 1.4.4 Estructura Estacional y/o Cíclica 1.5 Valoración de datos irregulares 1.6 Encuentro de fenómenos exógenos 1.7 Determinación del patrón estructural gráfico y numérico 1.8 Resultado del análisis integral previo	**Paso 1 – Observación y análisis de la demanda o fenómeno**
Paso 2 – Postulación de los modelos – Construcción de la hipótesis, con relación a los modelos - Cruce entre análisis y características de modelos clásicos y/o modernos	**Paso 2 – Postulación – Lanzamiento de Hipótesis**
Paso 3 – Validación de la Hipótesis 3.1 Doble recorte de la serie 3.2 Corrida de todos los modelos con primer recorte 3.3 Selección de los tres mejores modelos acertados con la realidad 3.4 Aplicación de los tres mejores clásicos o modernos al segundo recorte 3.5 Selección del mejor modelo 3.6 Cálculo de pronósticos de demanda con el mejor modelo y sus parámetros 3.7 Comparación de la realidad y el pronóstico calculado en período anterior 3.8 Estimación del Goodness of Fit o Bondad de Ajuste 3.9 Consenso con ventas, comercialización, inventarios, mercadeo, etc. 3.10 Estrategias y acciones de mercadeo, producción, inventarios, etc. en función del área temática del pronóstico.	**Paso 3 – Validación real de la Hipótesis** **Conversión de Hipótesis en tesis**
Paso 4 – Nuevo cálculo de pronóstico de demanda en próximo período	

4.6.2.1.1 Clases de métodos futurísticos según el tiempo a evaluar

Las tres grandes categorías que se establecen a la luz de esta óptica de parámetros de uso y aplicación, son:

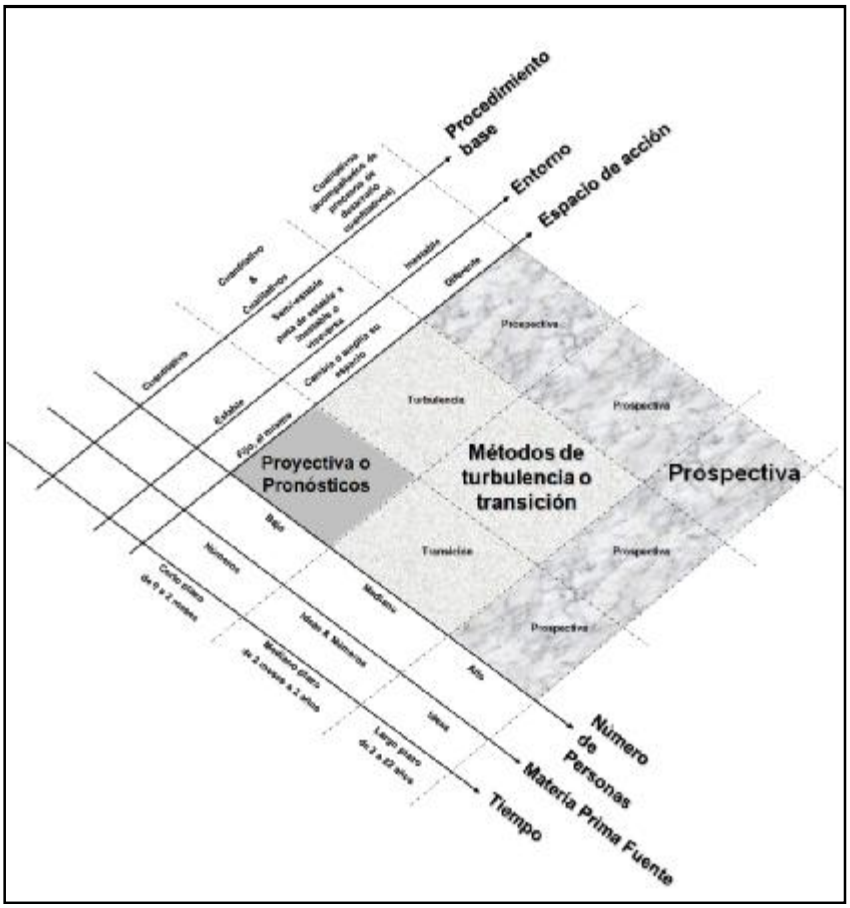
- Estudios proyectivos, son estudios que básicamente son de corto plazo, de basan en datos numéricos y solo trabajan cuando el entorno es estable (así la variable oscile en sus valores). Lo usual es que extrapolen situaciones del pasado y del presente hacia el futuro, aunque existe la excepción de los modelos modernos denominados *AR.I.MA.* en las series temporales (que son capaces de detectar situaciones a futuro que no tienen relación con el pasado (que se obtienen de los residuos en las comparaciones correlacionales de los datos del pasado), al menos numéricamente).

- Estudios de turbulencia o transición, son muy útiles cuando el entorno inestable se vuelve estable o a la inversa.

- Estudios prospectivos, son metodologías de largo plazo, habitualmente combina muchos métodos, solo se deben usar en entornos cambiantes de orden inestable; trabajan casi siempre a partir de ideas.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 74 - Clasificación y caracterización de los métodos futurísticos



Los métodos proyectivos se caracterizan por ser aplicaciones de corto plazo[190], se desarrollan en entornos estables aún cuando la variable oscile fuertemente alrededor de una media, son de orden probabilístico y en especial se definen por ser temporales, como su mismo nombre los describe. Lo normal es que intervengan pocas personas en sus desarrollos (por un lado el (los) pronosticador (es) y por el otro el (los) experto (s) en el tema que se pronostica).

El espacio normalmente debe permanecer inmóvil, es decir la variable kantiana del sitio debe ser fija, ya que se requiere cierto grado de estabilidad en el entorno, para que se pueda proyectar con exactitud el futuro de corto plazo, es importante recordar que la estabilidad del contexto, donde se desenvuelve el fenómeno que se pronostica debe ser constante. La base fundamental de trabajo en la proyectiva son números (valores de una variable) secuenciales en el tiempo que constituyen la serie temporal. Son estudios univariados, donde por lo general se desconoce el comportamiento de las causas que los originan o los impactan.

Los métodos proyectivos de series temporales, se basan exclusivamente en una extrapolación de los datos del presente y del pasado hacia el futuro, lo que denota que las causas que originan el comportamiento numérico en el pasado y en el presente, son los mismos[191] que patronean el comportamiento futuro. La temporalidad del corto plazo solo puede ser prolongada en ciertos eventos naturales como en la astronomía, donde lo más corriente es que el entorno permanece constante, con variaciones minúsculas o insignificantes.

La estabilidad del entorno se refleja en la hipótesis de que las pautas que determinan el estado futuro de la

---

190 Se utilizan más que todo para períodos de uno o dos meses, cuando la base temporal es un mes, cuando se trabaja en días se recomienda pronosticar hasta unos 10 días hábiles máximos, en semanas hasta dos, en horas hasta unas diez, etc y así sucesivamente.

191 Aunque se hace la observación de que pueden aparecer ciertos datos a futuro cuya causa, no necesariamente está originada exactamente en valores anteriores, esto es el caso de los componentes MA en los AR.I.MA.s sobre todo en el componente tradicional (no tanto en el estacional o temporal), por ejemplo un AR.I.MA. (0,0,5)(0,0,0) puede mostrar situaciones futuras aleatorias, no necesariamente extrapoladas del pasado. El comportamiento no basado en el pasado se puede originar en los errores que tratan de las medias móviles.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

variable son las mismas del pasado y del presente, que solo presentan ciertas variaciones producto de las circunstancias del entorno, pero en todo caso pertenecientes a la variable en sí, estas oscilaciones se concretan en una primera división de los modelos de series temporales: unos de pauta fija que son determinísticos, donde el patrón o la estructura del pasado permanece en el futuro y los modelos modernos, donde los valores que se obtienen son la manifestación de procesos estocásticos con ciertas estructuras que permanecen estables a futuro y que sus oscilaciones naturales pertenecen a la propia estructura de la serie evaluada.

Los pronósticos son generalmente probables, es decir la probabilidad de ocurrencia es la misma propiedad de que ocurran en el tiempo, si se sigue la metodología universal MUP[192], descrita anteriormente por el autor, lo más posible es que los pronósticos se acerquen bastante a los valores reales, esto presupone entonces que la proyectiva es condicionada, es decir que el pasado explica el futuro, a diferencia de la prospectiva donde el futuro explica el pasado.

Normalmente el futuro que se calcula con las series temporales es cierto, mientras que en la prospectiva o en la turbulencia el porvenir es múltiple e incierto. Los métodos proyectivos numéricos se adaptan pasivamente a la metodología que se desarrolla para su estimación, mientras que la prospectiva en sí, es creativa y participa activamente en la creación intelectual del futuro.

En los modelos proyectivos multivariados, la hipótesis normal es que las variables no se relacionan entre sí, lo que se puede asumir como una limitación a este método futurístico, pero de todas maneras a pesar de esta condición, son muy útiles y acertados, de aquí se deduce que la gran utilidad de los modelos proyectivos de series temporales es cuando se usan para estudios univariados y cuando de alguna manera se desconocen las causas que los imputan, pues en ese caso donde se tenga claridad de cuáles son las variables que los afectan, más bien se estudia el futuro de estas causas, que el de la variable efecto primaria.

Existen además de los métodos proyectivos numéricos, los modelos normativos, que se acercan más a la prospectiva, pues se basan en la postulación de un futuro, el cual es alcanzable por distintas rutas, las herramientas normativas tratan entonces de auscultar y decidir esas posibles alternativas y poder deducir la transición del presente al futuro propuesto.

Se puede definir una serie temporal, como un conjunto de datos obtenidos del análisis y de las observaciones de una variable discreta durante un lapso secuencial de tiempo, es importante recordar que existen datos no temporales, que son observaciones realizadas de una forma no hilada en el tiempo. En general se puede concretar que una serie temporal de datos es un conjunto de valores de una variable, asociados a otro grupo de instantes definidos de tiempo; lo que implica el estudio de dos variables, donde una de ellas es el tiempo y la otra representa el fenómeno que se desea pronosticar.

Algunas de las áreas empresariales donde se practican con intensidad los pronósticos, son:

- Previsión tecnológica, esta busca pronosticar cambios futuros en el sector en donde está ubicada la empresa y en aquellos entornos donde se consumen los productos que se fabrican.

- Previsión de ventas, esta se basa en las estimaciones sobre las posibles cuotas de mercado de la empresa en cada segmento; le permite a la organización planificar el resto de las actividades más importantes: producción, inversiones, gastos, contratación de personal, inventarios, demanda, materias primas, etc.

- Previsiones demográficas, tales como: tasas de natalidad, de nupcialidad, volúmenes de enfermedades, etc.; tienen interés para pronosticar las demandas de la sociedad en productos o servicios, ejemplos de estos son los cupos en las universidades o los artículos para bebés.

- Previsión de recursos humanos, es una conjetura sobre las necesidades futuras de personal en las empresas en sus diferentes áreas (De Miguel, 1990).

- Previsiones diferentes, existe una amplia gama de aplicaciones sociales y empresariales.

[192] *MUP – Metodología Universal de Pronósticos, propuesta en este libro.*

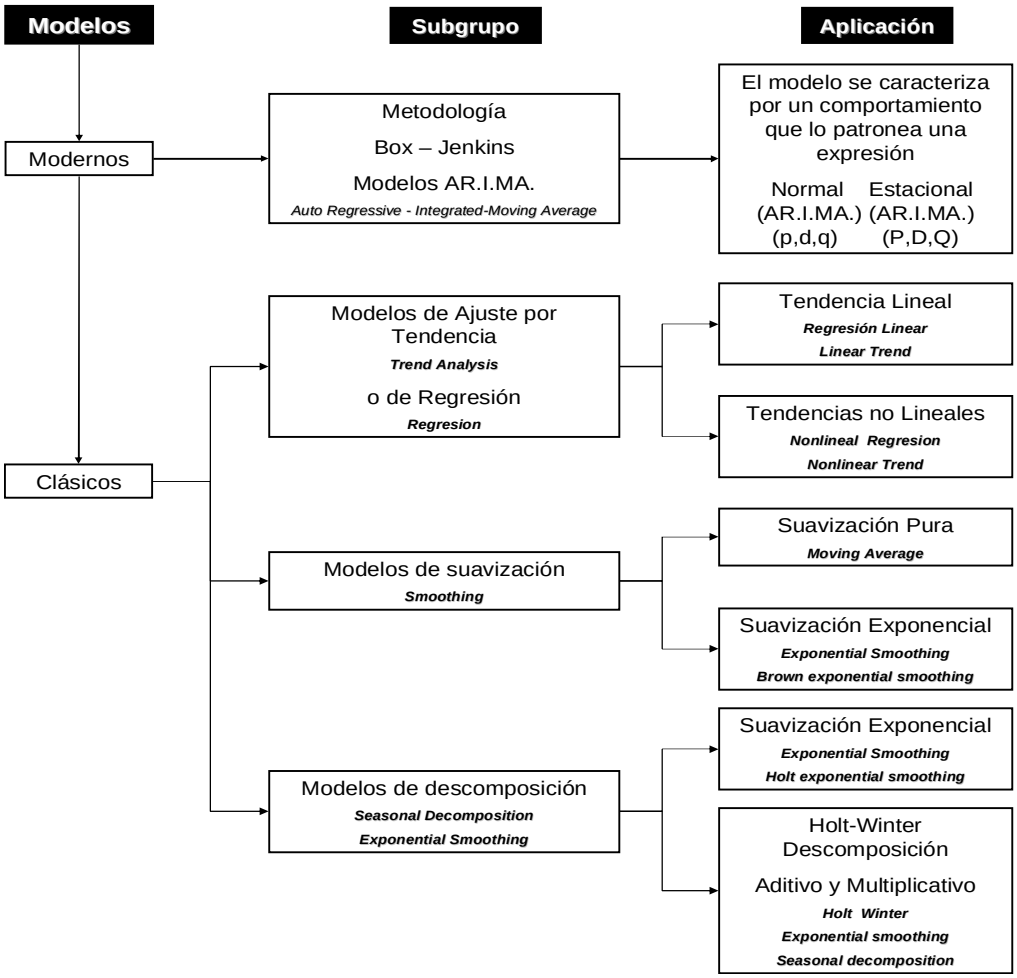
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Se deben entender entonces, los métodos de predicción como una ayuda en la toma de decisiones en las empresas, en los negocios, en los inventarios, en el comportamiento de máquinas, en las trayectorias de cuerpos, etc.; no se deben considerar nunca como infalibles, de por sí son excelentes herramientas para el análisis y si bien los pronósticos numéricos son relevantes, más importantes son los parámetros que se adquieren por parte del (los) pronosticador (es) y del equipo de expertos conocedores del fenómeno que se pronostica, para estudiar profundamente las situaciones que controlan y patronean la variable que se analiza, es inconmensurable la cantidad de beneficios y la profesionalización en el dominio de la serie que se estudia, que se adquieren durante el desarrollo por parte de los analistas.

Otro punto importante, es que son los análisis de posición tendencial de los pronósticos, que permiten de alguna manera conocer y deducir situaciones futuras, al analizar los modelos y su posición jerárquica en las últimas proyecciones que se realizan, el análisis de la posición de los diferentes modelos de pronósticos, el cual consiste en observar secuencialmente durante los últimos períodos que se evalúan, la ubicación de los diferentes modelos AR.I.MA. y de los distintos modelos clásicos, para asumir o conjeturar sobre cuáles son los futuras posiciones que pueden asumir, esta metodología se presenta como una ayuda complementaria.

Por ejemplo en una serie evaluada hace cuatro períodos el modelo Brown (de suavización especializada para fenómenos con aleatoriedad o ruido) se ubica en el décimo lugar, hace tres períodos se halla en el séptimo lugar, en el estudio anterior se coloca en el cuarto lugar y en el análisis presente se sitúa en el segundo lugar; esto da pie a pensar que en el período dos a futuro es el modelo que podría fijar las pautas de comportamiento de la serie, lo que permite ampliar (aunque de manera subjetiva (no científica)) el espectro de validez de los pronósticos y permite tener una herramienta adicional de análisis (Mora, 2007c).

Ilustración 75 - Tipos, criterios y usos de los diferentes Modelos de Pronósticos



(Mora, 2007c)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4.6.2.1.2 Modelos AR.I.MA. – Metodología Box - Jenkins

Son de carácter general, esto denota que siempre existe uno de ellos que se adecua a cualquier serie temporal por más especial que esta sea; otro asunto es, si esta modelación de pronto no copia fielmente los valores reales del fenómeno evaluado; pero en todo caso se puede afirmar que siempre existe un modelo AR.I.MA., que es capaz de simular cualquier variable temporal.

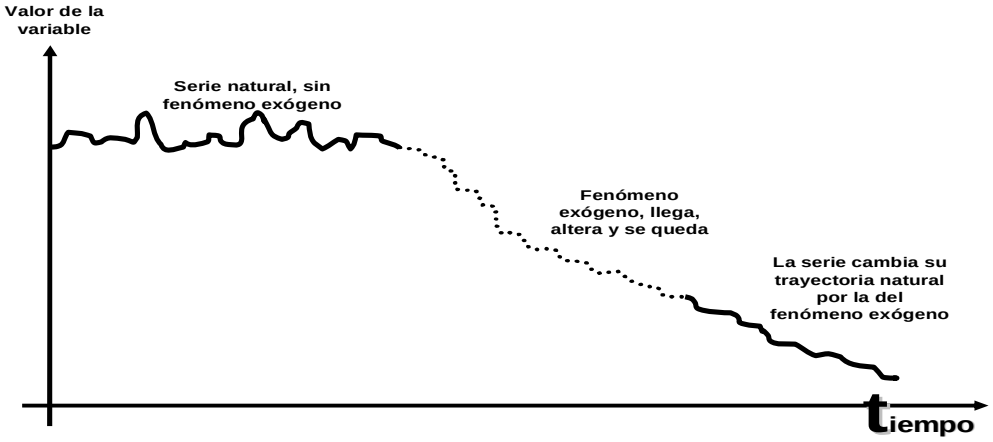
Desde el punto de vista de los procesos estocásticos, se puede afirmar que una serie temporal es una realización parcial de un proceso estocástico de parámetro de tiempo discreto.

4.6.2.1.3 Características de los AR.I.MA.

- Estocásticos: ya que se basan en estos procesos, no se les expresa en forma determinística con ecuaciones, sino con expresiones que involucran operadores.
- Pronósticos: los modelos modernos pueden lanzar pronósticos que estén en función neta del pasado, pero también pueden predecir hechos totalmente novedosos que muy poca o ninguna relación tengan con los eventos ya descritos del pasado; como también una combinación de los anteriores, pronósticos que por una parte dependan del pasado y por otra parte sean totalmente aleatorios.
- Fenómenos exógenos: estos se involucran, alteran la serie y pasan a formar parte de ella.
- Simple vista: no es factible predecir el comportamiento futuro de la serie con la simple observación humana, en los modelos modernos.

Los modelos *AR.I.MA.*, por su parte, muestran ante la presencia de fenómenos exógenos un cambio en su comportamiento, ya que adoptan en forma definitiva el perfil de este último.

Ilustración 76 - Fenómeno exógeno en un modelo AR.I.MA.



4.6.2.1.4 Descripción de los modelos AR.I.MA. (Modernos)

Así como los modelos clásicos tienen su inicio antes de 1950 y de ahí en adelante gozan de un gran desarrollo, específicamente los avances más notables se dan en los modelos Brown en 1950, en los Holt en 1952, en los Winters en 1960 y en los modelos de descomposición se sucede entre 1957 y 1961 (con Shiskin, del *Census Bureau* de los Estados Unidos de América); con la aparición de computadores más eficaces y mayor cantidad de aplicaciones estadísticas, ocurren varios desarrollos relevantes en todos los métodos existentes hasta ese momento, más sin embargo entre las décadas de 1950 y 1960 se busca la unificación e integración de todos estos avances, lo cual sucede gracias a que es puesta al servicio de la humanidad bajo la metodología de Box y Jenkins una técnica integradora, sus desarrolladores en 1976, involucran una práctica sistemática para el análisis de cualquier tipo de estructura de series de tiempo de una forma general, de donde se deduce que es un método

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

genérico que sirve para analizar cualquier conjunto temporal de datos, con las estructuras y formas que posea, sea cual fueren.

Los modelos modernos de promedio móvil auto regresivo *AR.I.MA.*, son más generales y teóricos que los de ajuste por tendencia, que los de suavización o que los de descomposición, son capaces de tratar cualquier patrón de datos y a la vez son aptos para establecer directamente un modelo estadístico de clase general que simule más adecuadamente la serie de datos temporales, en vez de usar modelos estrechos o específicos, como los clásicos.

Unas herramientas básicas para la aplicación de estos modelos son la auto-correlación y los promedios móviles; los hay desde unos muy simples hasta más avanzados que usan la metodología Box – Jenkins, y existen otros más sofisticados como los modelos ARARMA de Parzen[193], el filtrado AEP o de Kalman, o variaciones como el FORSYS de Lewandowski y los multivariables AR.I.MA. (Mora, 2007c).

Las técnicas de los modelos AR.I.MA. se basan en una síntesis de los patrones históricos de los datos, son una clase especial de métodos de filtrado que desconocen por completo a las variables independientes, son herramientas de alto refinamiento que utilizan los valores reales y anteriores de la variable dependiente para generar pronósticos bastante exactos de corto plazo, son muy apropiadas cuando los valores de la serie que se pronostica están correlacionados o son dependientes estadísticamente entre sí.

4.6.2.1.4.1 Metodología Box – Jenkins

Nace en 1976 con la publicación del libro *"Time Series Analysis: Forecasting and Control"* de los autores G. E. P. Box, Profesor de la asignatura Estadística de la Universidad de Wisconsin (Estados Unidos de América) y del Profesor G. M. Jenkins de la Universidad de Lancaster (Inglaterra) de la materia Ingeniería de Sistemas; quienes generan un proceso novedoso en el análisis de series temporales en la realización de un trabajo sobre contaminación en la bahía de San Francisco (Estados Unidos), a fin de lograr mejores herramientas de procesos y control de pronósticos; el modelo que desarrollan alcanza un gran éxito y se constituye en la metodología conocida como Box – Jenkins de *AR.I.MA.*

La metodología Box – Jenkins de pronósticos es bastante particular y muy diferente de la mayoría de los demás métodos de previsiones, ella no asume ningún patrón específico de los valores de la serie que se pronostica, utiliza un modelo basado en iteraciones que permite identificar el mejor modelo a partir de patrones de tipo general. El modelo se ajusta siempre y cuando los residuos entre el modelo real y el seleccionado sean bajos y se distribuyan de una forma aleatoria e independiente, a lo largo del tiempo; este proceso se repite sucesivamente hasta alcanzar el modelo que más se ajuste a estas especificaciones. Son especialmente apropiados para series estacionarias en media, denominación esta que se otorga a las series históricas cuyo promedio no varía significativamente a través del tiempo. La selección del modelo apropiado se realiza mediante la comparación de la distribución de los coeficientes de auto correlación (simple) (ACF) y parcial (PACF) con los modelos teóricos que se presentan más adelante en la Ilustración definida como Diferentes correlogramas para identificar a p, q, P o Q.

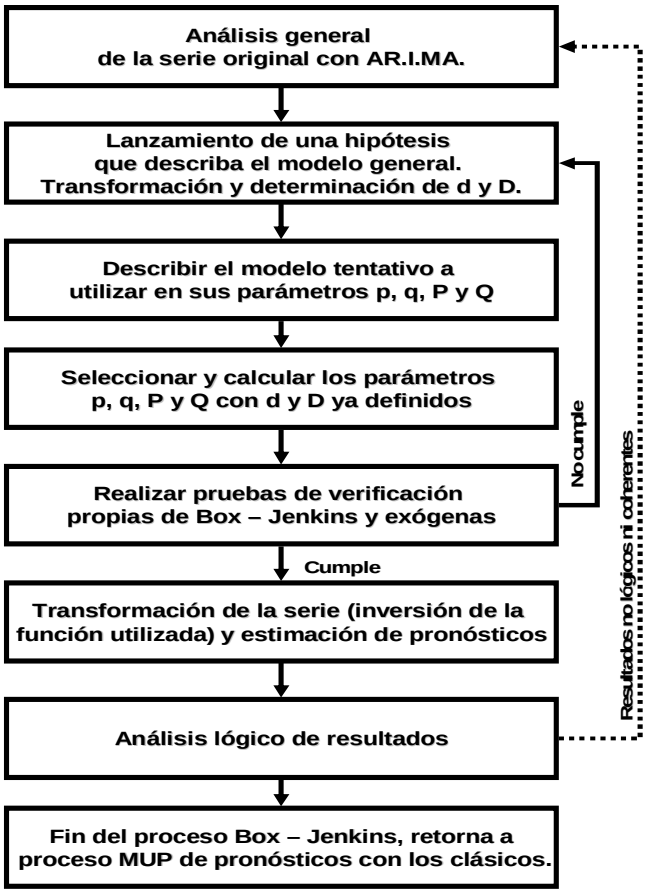
La metodología Box – Jenkins se lleva a cabo en tres etapas:

- Identificación del modelo
- Estimación del modelo y prueba de su ajuste
- Previsiones con el modelo ajustado que se selecciona.

[193] *El modelo ARARMA de Parzen permite mejorar el espectro de la estacionariedad (centramiento de la media y eliminación del ruido o aleatoriedad o desviación estándar) de la metodología de Box – Jenkins con el operador diferencia, a la vez que amplía el uso de Box – Jenkins y facilita la aplicación más generalizada de los modelos modernos de series temporales .*

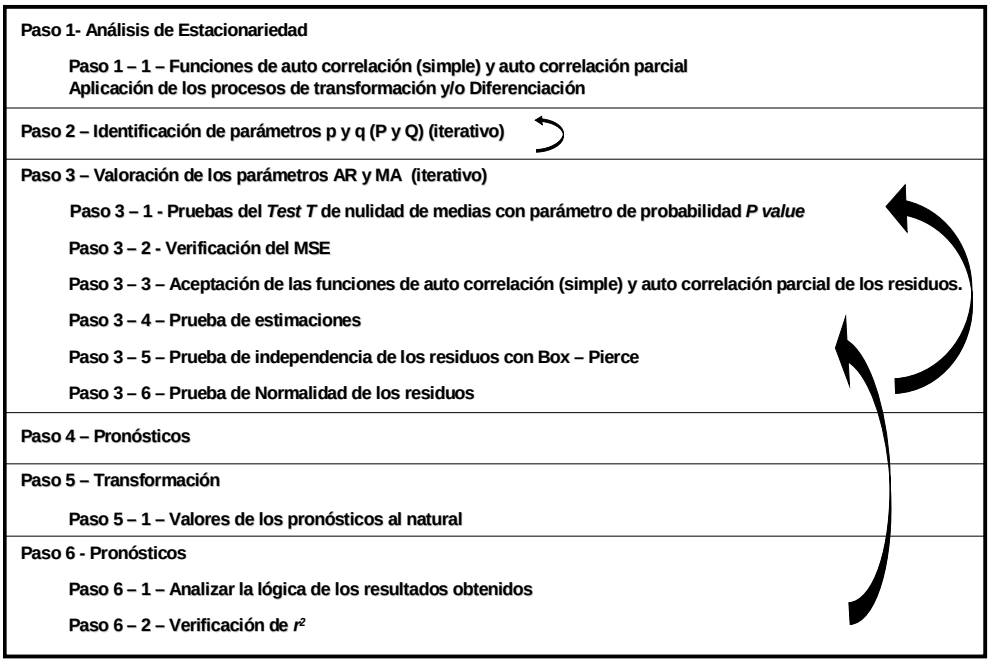
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 77 - Metodología AR.I.MA. Box – Jenkins



(Mora, 2007c)

Ilustración 78 - Procesos generales de los modelos AR.I.MA., con metodología Box - Jenkins

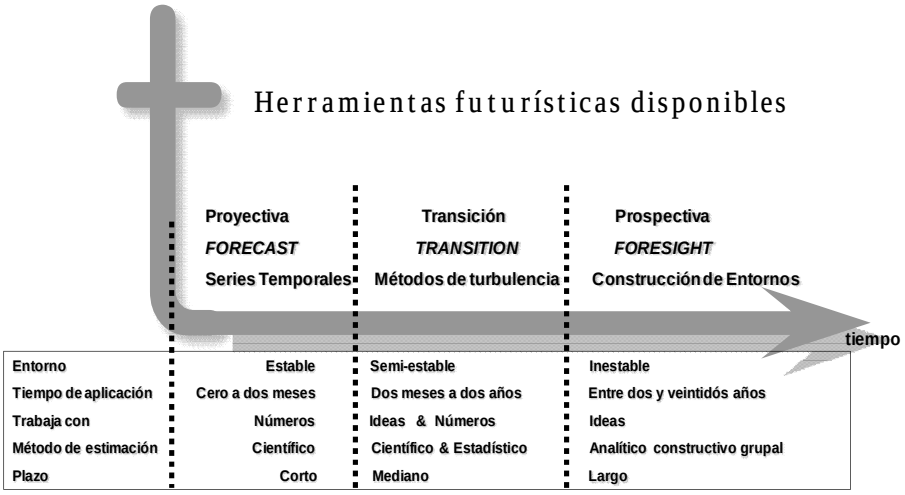


(Mora, 2007c)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

El símbolo de flecha curva denota que es iterativo, o que puede regresar al paso anterior si no se cumplen las expectativas de esa sección en particular.

Ilustración 79 - Integralidad de métodos futurísticos actuales



Ejemplo 30 - Mediciones CMD en turbinas pronosticadas con series temporales

La medición se hace inicialmente para las turbinas, punto a punto, por cada evento que ocurre, esto genera entonces la serie temporal, se toma el último dato el cual se reserva, posteriormente a través de la Metodología Universal de Pronósticos con Series Temporales, se calcula este último dato real y se comparan los resultados, obteniéndose en general unos buenos resultados con el pronósticos de los parámetros con la metodología de eventos que ocurren cada mes.

Los resultados que se registran y pronostican, son:

Series pronosticadas con SeriesTemporales		No Confiabilidad Planeada			Mantenibilidad Planeada			No Confiabilidad No Planeada			Mantenibilidad No Planeada		
Dato No.	FECHA - Año Mes	β*eta* $MTBM_P$	Eta η $MTBM_P$	$MTBM_P$	β*eta* M_P	Eta η M_P	M_P	β*eta* $MTBM_C$	Eta η $MTBM_C$	$MTBM_C$	β*eta* $MTTR$	Eta η $MTTR$	$MTTR$
	Año 1 - Mes 1	Aún no ocurren eventos			Aún no ocurren eventos			Aún no ocurren eventos			Aún no ocurren eventos		
	Año 1 - Mes 2	Aún no ocurren eventos			Aún no ocurren eventos			Aún no ocurren eventos			Aún no ocurren eventos		
	Año 1 - Mes 3	Aún no ocurren eventos			Aún no ocurren eventos			No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento		
	Año 1 - Mes 4	Aún no ocurren eventos			Aún no ocurren eventos			No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento		
	Año 1 - Mes 5	Aún no ocurren eventos			Aún no ocurren eventos			0.72	1456.51	1799.90	0.97	2.93	2.98
	Año 1 - Mes 6	Aún no ocurren eventos			Aún no ocurren eventos			0.72	1456.51	1799.90	0.97	2.93	2.98
	Año 1 - Mes 7	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.88	1507.07	1609.13	1.04	3.58	3.52
	Año 1 - Mes 8	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.88	1507.07	1609.13	1.04	3.58	3.52
	Año 1 - Mes 9	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.99	1597.68	1603.73	1.07	4.49	4.38
	Año 1 - Mes 10	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.53	896.18	1630.17	0.91	2.71	2.84
	Año 1 - Mes 11	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.55	971.03	1630.50	0.94	3.01	3.11
	Año 1 - Mes 12	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.55	971.03	1630.50	0.94	3.01	3.11
	Año 2 - Mes 1	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.58	1060.10	1686.44	0.983	3.178	3.201
	Año 2 - Mes 2	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.61	1053.36	1553.58	1.004	3.445	3.440
	Año 2 - Mes 3	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.63	1092.83	1542.43	1.027	3.659	3.619
	Año 2 - Mes 4	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.70	952.80	1203.36	0.991	3.536	3.550
	Año 2 - Mes 5	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.70	952.80	1203.36	0.991	3.536	3.550
	Año 2 - Mes 6	No calcula solo hay un evento			No calcula solo hay un evento			0.71	1020.77	1268.61	1.016	3.667	3.643
1	Año 2 - Mes 7	2.34	8122.05	7197.06	0.62	8.22	11.91	0.71	1020.77	1268.61	1.016	3.667	3.643
2	Año 2 - Mes 8	2.34	8122.05	7197.06	0.62	8.22	11.91	0.71	1020.77	1268.61	1.016	3.667	3.643
3	Año 2 - Mes 9	2.34	8122.05	7197.06	0.62	8.22	11.91	0.71	1020.77	1268.61	1.016	3.667	3.643
4	Año 2 - Mes 10	2.34	8122.05	7197.06	0.62	8.22	11.91	0.71	1020.77	1268.61	1.016	3.667	3.643
5	Año 2 - Mes 11	1.66	6631.60	5926.00	0.78	10.00	11.57	0.66	1032.96	1377.56	0.838	4.394	4.826
6	Año 2 - Mes 12	1.66	6631.60	5926.00	0.78	10.00	11.57	0.66	1032.96	1377.56	0.838	4.394	4.826
7	Año 3 - Mes 1	1.66	6631.60	5926.00	0.78	10.00	11.57	0.68	1080.33	1413.34	0.87	4.30	4.61
8	Año 3 - Mes 2	1.66	6631.60	5926.00	0.78	10.00	11.57	0.68	1080.33	1413.34	0.87	4.30	4.61
9	Año 3 - Mes 3	1.62	5760.80	5160.03	0.88	11.13	11.82	0.69	1147.57	1481.48	0.90	4.36	4.60
10	Año 3 - Mes 4	1.62	5760.80	5160.03	0.88	11.13	11.82	0.71	1113.40	1391.11	0.93	4.33	4.49
11	Año 3 - Mes 5	1.62	5760.80	5160.03	0.88	11.13	11.82	0.73	1106.32	1349.62	0.94	4.44	4.56
12	Año 3 - Mes 6	1.61	5069.09	4541.20	0.98	11.63	11.71	0.77	1040.51	1211.93	0.98	4.06	4.09
13	Año 3 - Mes 7	1.61	5069.09	4541.20	0.98	11.63	11.71	0.77	1040.51	1211.93	0.98	4.06	4.09
14	Año 3 - Mes 8	1.61	5069.09	4541.20	0.98	11.63	11.71	0.77	1040.51	1211.93	0.98	4.06	4.09
15	Año 3 - Mes 9	1.61	5069.09	4541.20	0.98	11.63	11.71	0.77	1040.51	1211.93	0.98	4.06	4.09
16	Año 3 - Mes 10	1.61	5069.09	4541.20	0.98	11.63	11.71	0.77	1115.73	1299.36	1.00	4.16	4.16
17	Año 3 - Mes 11	1.61	5069.09	4541.20	0.98	11.63	11.71	0.77	1115.73	1299.36	1.00	4.16	4.16
18	Año 3 - Mes 12	1.61	5069.09	4541.20	0.98	11.63	11.71	0.77	1115.73	1299.36	1.00	4.16	4.16
19	Año 4 - Mes 1	1.61	5069.09	4541.20	0.98	11.63	11.71	0.77	1115.73	1299.36	1.00	4.16	4.16
20	Año 4 - Mes 2	1.61	5069.09	4541.20	0.98	11.63	11.71	0.77	1115.73	1299.36	1.00	4.16	4.16
21	Año 4 - Mes 3	1.76	5442.17	4844.85	1.21	10.12	9.50	0.77	1115.73	1299.36	1.00	4.16	4.16
22	Año 4 - Mes 4	0.81	4103.65	4607.92	1.48	8.54	7.72	0.77	1115.73	1299.36	1.00	4.16	4.16
23	Año 4 - Mes 5	0.81	4103.65	4607.92	1.48	8.54	7.72	0.76	1229.04	1446.66	1.02	4.18	4.15
24	Año 4 - Mes 6	0.81	4103.65	4607.92	1.48	8.54	7.72	0.77	1262.90	1471.19	1.04	4.23	4.16
25	Año 4 - Mes 7	0.81	4103.65	4607.92	1.48	8.54	7.72	0.77	1262.90	1471.19	1.04	4.23	4.16
26	Año 4 - Mes 8	0.81	4103.65	4607.92	1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26	1.02	4.04	4.01
27	Año 4 - Mes 9	0.81	4103.65	4607.92	1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26	1.02	4.04	4.01
28	Año 4 - Mes 10	0.81	4103.65	4607.92	1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26	1.02	4.04	4.01
29	Año 4 - Mes 11	0.81	4103.65	4607.92	1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26	1.02	4.04	4.01
30	Año 4 - Mes 12	0.81	4103.65	4607.92	1.48	8.54	7.72	0.78	1273.93	1465.26	1.02	4.04	4.01

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Series pronosticadas con SeriesTemporales		No Confiabilidad Planeada				Mantenibilidad Planeada				No Confiabilidad No Planeada				Mantenibilidad No Planeada			
Dato No.	FECHA - Año Mes	β eta $MTBM_P$	Eta η $MTBM_P$	$MTBM_P$		β eta M_P	Eta η M_P	M_P		β eta $MTBM_C$	Eta η $MTBM_C$	$MTBM_C$		β eta $MTTR$	Eta η $MTTR$	$MTTR$	
31	Año 5 - Mes 1	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72		0.78	1273.93	1465.26		1.02	4.04	4.01	
32	Año 5 - Mes 2	0.81	4103.65	4607.92		1.48	8.54	7.72		0.78	1273.93	1465.26		1.02	4.04	4.01	
33	Año 5 - Mes 3	0.59	2803.16	4355.30		1.46	8.41	7.62		0.77	1391.27	1617.26		1.04	4.01	3.94	
34	Año 5 - Mes 4	0.61	2500.63	3680.28		1.51	8.13	7.33		0.77	1391.27	1617.26		1.04	4.01	3.94	
35	Año 5 - Mes 5	0.47	1957.16	4334.66		1.11	7.18	6.90		0.79	1388.73	1593.45		1.04	3.86	3.80	
36	Año 5 - Mes 6	0.49	1891.45	3894.12		1.13	7.42	7.09		0.79	1388.73	1593.45		1.04	3.86	3.80	
37	Año 5 - Mes 7	0.49	1891.45	3894.12		1.13	7.42	7.09		0.80	1400.84	1590.49		1.07	3.81	3.72	
38	Año 5 - Mes 8	0.49	1891.45	3894.12		1.13	7.42	7.09		0.81	1405.69	1579.61		1.08	3.84	3.73	
39	Año 5 - Mes 9	0.49	1891.45	3894.12		1.13	7.42	7.09		0.81	1405.69	1579.61		1.08	3.84	3.73	
40	Año 5 - Mes 10	0.49	1891.45	3894.12		1.13	7.42	7.09		0.82	1426.06	1589.37		1.10	3.89	3.75	
41	Año 5 - Mes 11	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35		0.82	1426.06	1589.37		1.10	3.89	3.75	
42	Año 5 - Mes 12	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35		0.84	1397.09	1529.60		1.10	3.66	3.53	
43	Año 6 - Mes 1	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35		0.84	1397.09	1529.60		1.10	3.66	3.53	
44	Año 6 - Mes 2	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35		0.84	1397.09	1529.60		1.10	3.66	3.53	
45	Año 6 - Mes 3	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35		0.84	1397.09	1529.60		1.10	3.66	3.53	
46	Año 6 - Mes 4	0.50	2017.99	4000.94		1.15	7.72	7.35		0.85	1418.70	1543.39		1.12	3.61	3.46	
47	Año 6 - Mes 5	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62		0.80	1353.00	1534.99		1.12	3.56	3.41	
48	Año 6 - Mes 6	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62		0.80	1353.00	1534.99		1.12	3.56	3.41	
49	Año 6 - Mes 7	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62		0.80	1353.00	1534.99		1.12	3.56	3.41	
50	Año 6 - Mes 8	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62		0.80	1410.21	1598.72		1.14	3.57	3.41	
51	Año 6 - Mes 9	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62		0.81	1375.13	1542.36		1.14	3.49	3.33	
52	Año 6 - Mes 10	0.52	2081.95	3829.24		1.03	7.72	7.62		0.82	1323.32	1475.23		1.14	3.41	3.25	
53	Año 6 - Mes 11	0.53	2233.92	4026.93		1.06	7.56	7.39		0.83	1330.21	1472.49		1.13	3.32	3.18	
54	Año 6 - Mes 12	0.53	2233.92	4026.93		1.06	7.56	7.39		0.83	1330.21	1472.49		1.13	3.32	3.18	
55	Año 7 - Mes 1	0.53	2233.92	4026.93		1.06	7.56	7.39		0.83	1330.21	1472.49		1.13	3.32	3.18	
56	Año 7 - Mes 2	0.54	2312.83	4044.50		1.07	7.81	7.60		0.83	1330.21	1472.49		1.13	3.32	3.18	
57	Año 7 - Mes 3	0.56	2250.34	3775.87		1.10	7.75	7.48		0.84	1332.60	1460.71		1.14	3.37	3.22	
58	Año 7 - Mes 4	0.56	2250.34	3775.87		1.10	7.75	7.48		0.84	1332.60	1460.71		1.14	3.37	3.22	
59	Año 7 - Mes 5	0.56	2250.34	3775.87		1.10	7.75	7.48		0.84	1332.60	1460.71		1.14	3.37	3.22	
60	Año 7 - Mes 6	0.57	2284.94	3719.53		1.11	7.98	7.68		0.84	1332.60	1460.71		1.14	3.37	3.22	
61	Año 7 - Mes 7	0.58	2226.94	3506.54		1.13	7.67	7.34		0.84	1332.60	1460.71		1.14	3.37	3.22	
62	Año 7 - Mes 8	0.58	2226.94	3506.54		1.13	7.67	7.34		0.85	1302.76	1417.36		1.13	3.33	3.19	
63	Año 7 - Mes 9	0.58	2226.94	3506.54		1.13	7.67	7.34		0.85	1302.76	1417.36		1.13	3.33	3.19	
64	Año 7 - Mes 10	0.59	2288.90	3530.54		1.14	7.88	7.52		0.85	1302.76	1417.36		1.13	3.33	3.19	
65	Año 7 - Mes 11	0.59	2288.90	3530.54		1.14	7.88	7.52		0.85	1302.76	1417.36		1.13	3.33	3.19	
	Real Año 7 - Mes 12	0.59	2288.90	3530.54		1.14	7.88	7.52		0.85	1302.76	1417.36		1.13	3.33	3.19	
	Error *Goodness of Fit*	-34.10%	-27.71%	0.81%	69.73%	10.46%	-9.38%	-12.99%	-11.70%	2.89%	11.24%	0.25%	9.34%	-0.07%	-0.50%	-2.06%	-0.48%
		Pronósticos	Pronósticos	Pronósticos	Fórmula	Pronósticos	Pronósticos	Pronósticos	Fórmula	Pronósticos	Pronósticos	Pronósticos	Fórmula	Pronósticos	Pronósticos	Pronósticos	Fórmula
	AÑO 7 MES 12	0.39	1654.54	3558.97	5992.52	1.26	7.14	6.55	6.64	0.87	1449.23	1420.96	1549.77	1.13	3.32	3.12	3.17
	AÑO 8 MES 1	0.37	1618.77	3499.04	6577.98	1.26	7.11	6.48	6.60	0.87	1457.98	1424.56	1565.37	1.11	3.35	3.17	3.22
	AÑO 8 MES 2	0.37	1626.29	3484.35	6585.97	1.26	7.11	6.51	6.61	0.87	1459.01	1428.16	1566.31	1.11	3.34	3.16	3.21
	AÑO 8 MES 3	0.36	1474.16	3332.81	6762.58	1.34	6.98	6.22	6.41	0.88	1509.71	1434.70	1607.52	1.12	3.35	3.15	3.21
	MODELO	Exponencial	Exponencial	ARIMA (0X0)(000)		Exponencial	Tendencial	Exponencial		Exponencial	Exponencial	ARIMA (011)(100)x12		SEST	Exponencial	Exponencial	
	Promedio general 1.16%	86.00%	90.00%	93.00%	R^2	86%	78%	95%	R^2	31.00%	64.00%	86.74%	R^2	54.00%	65.00%	69.00%	R^2

Programa de CD 4 - Cálculo de Pronósticos Clásicos de series temporales

Este programa en Excel permite el cálculo de pronósticos con los modelos clásicos, existen muchos y diversos programas para AR.I.MA. y clásicos como Centurion Statgraphics XV, Forecast Pro, Vanguard Decision Making, Logarex, Forecast Expert trial, Minitab, etc.; que permiten cálculos muy exactos de pronósticos, con errores de un dígito en promedio.

Retomando el tema de CMD, se sugieren algunos análisis complementarios, para el logro de predicciones ajustadas a la realidad futura:

En confiabilidad:

- Estadística descriptiva y presentación gráfica de la información.
- Diagramas de Pareto.
- Histogramas.
- Tendencias y comportamientos de parámetros, evaluados como series temporales con pronósticos.
- Test actuarial para obtener la curva de tasa de fallas.
- Test de confiabilidad para determinar los equipos más críticos en C.
- Test no paramétricos de Mann y Proskan-Pyke para determinar el comportamiento presente y futuro de la tasa de fallas.
- Construcción de leyes, a través del estudio de probabilidades, mediante la utilización del modelo universal que se presenta en el capítulo dos, con el apoyo de todas las distribuciones ya citadas y las pruebas estadísticas y de bondad de ajuste ,mencionadas en secciones anteriores.

Para mantenibilidad, se recomienda la construcción y determinación de leyes a partir de su evaluación con el modelo universal CMD propuesto, el uso de distribuciones, y demás parámetros ya establecidos.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Para disponibilidad, se propone usar la estadística descriptiva junto con la determinación de leyes que permitan su constante medición, interpretación y análisis para definir tácticas y estrategias adecuadas de mantenimiento y producción (Díaz, 1992).

4.7 Diferentes niveles de cálculo para el CMD - Fases

El cálculo y la estimación del CMD se desarrolla en niveles, lo habitual es que en su orden sea inicialmente casos sencillos de elementos individuales con evaluación mediante promedios numéricos aritméticos simples, una vez se domina esto se procede posteriormente con cálculos basados en las distribuciones descritas en capítulos anteriores.

Luego de superar esta etapa se pasa a la estimación de conjuntos de elementos, o sea sistemas o máquinas complejas, igual que en el anterior se cubre en primera instancia con promedios matemáticos simples y en seguida se procede a un nivel superior mediante cálculos con distribuciones; se parte de la premisa de que se reconocen solo dos posibles estados[194] para los elementos o las máquinas (Lewis, 1995).

Un estrato superior de análisis CMD da la posibilidad de hacer estudios CMD mediante la asunción de múltiples estados posibles de ocurrir en un sistema entre falla (*SoFa*) y operación normal (*SoFu*) y la evaluación de sus probabilidades de transición entre estos estados, bajo modelos de Markov y toda su evaluación; también es factible evaluar los parámetros del CMD a través de las técnicas de simulaciones de Montecarlo (Díaz, 1992).

Por último, en los análisis de las diferentes distribuciones hasta ahora citadas, se trabaja solamente en una fase de la curva de la bañera o de la tasa de fallas, existen alternativas de análisis con otras distribuciones que evalúan dos y tres fases.

El estudio de la vida útil integral mediante la evaluación completa de las tres fases o parcial con la revisión de dos fases, toma acentuado interés en la actualidad a nivel mundial en los autores especializados en el tema CMD.

4.7.1 Distribución Hastings de dos fases.

Entre las distribuciones factibles de cubrir dos etapas de la curva de tasa de fallas, está Hastings, la cual se deriva de la adición en el tiempo de dos funciones de tasa de fallas de la distribución Weibull, en la primera etapa (izquierda) trabaja con dos parámetros y en la fase final (derecha) trabaja con tres.

Ecuación 56 - Distribución Hastings.

$$Tasa\ de\ Fallas\ =\ Lambda\ \ (t) = k * l * C * t^{C-1} + (1-k) * b * t^{b-1} * b * \exp^{b * t^{b}}$$

$$Función\ de\ confiabilidad = R(t) = \exp^{(-k * l * t^{C} - (1-k) * (\exp^{b * t^{b}} - 1))}$$

con sus características definidas como:

βeta y Lambda son los factores de escala.

b y C son factores de forma

C, β y λ > 0

k está entre 0 y 1

Hastings tiene algunos casos especiales, cuando:

k=1 es Weibull

k=0 y b =1 se trata de la distribución de valores extremos

[194] *Falla SoFa o Funcionamento SoFu.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

C=0.5 y b=1 es una curva de la bañera.

(Ramakumar, 1996)

Ilustración 80 - Ejemplo de curvas características de la distribución Hastings de dos fases, basada en Weibull de 2 y 3 parámetros

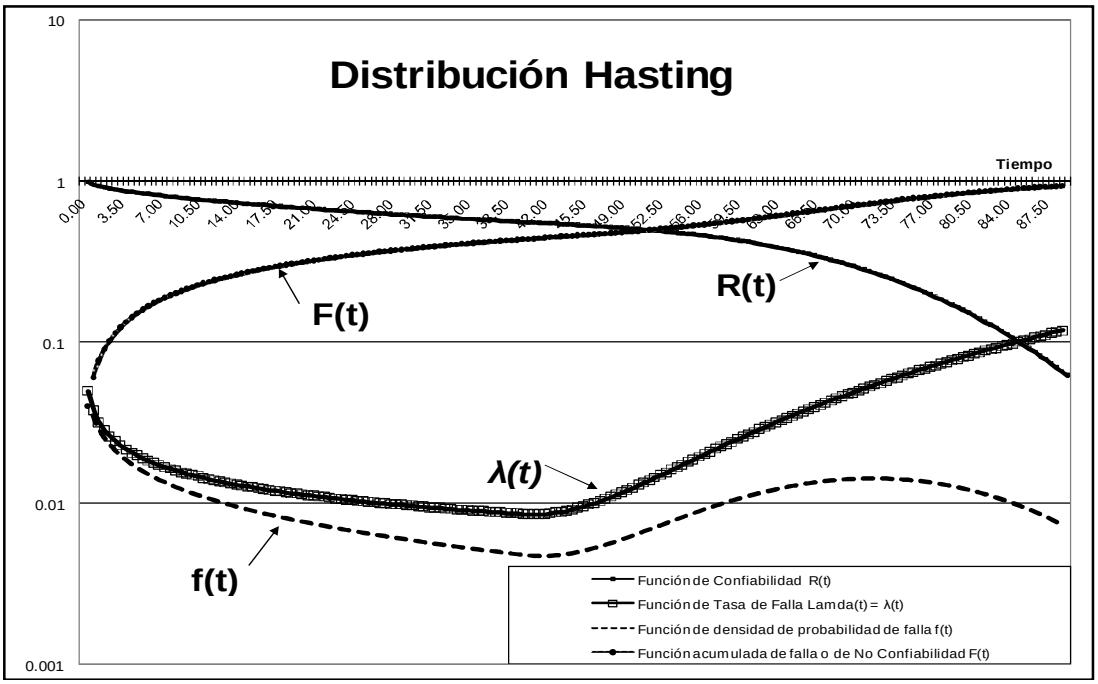
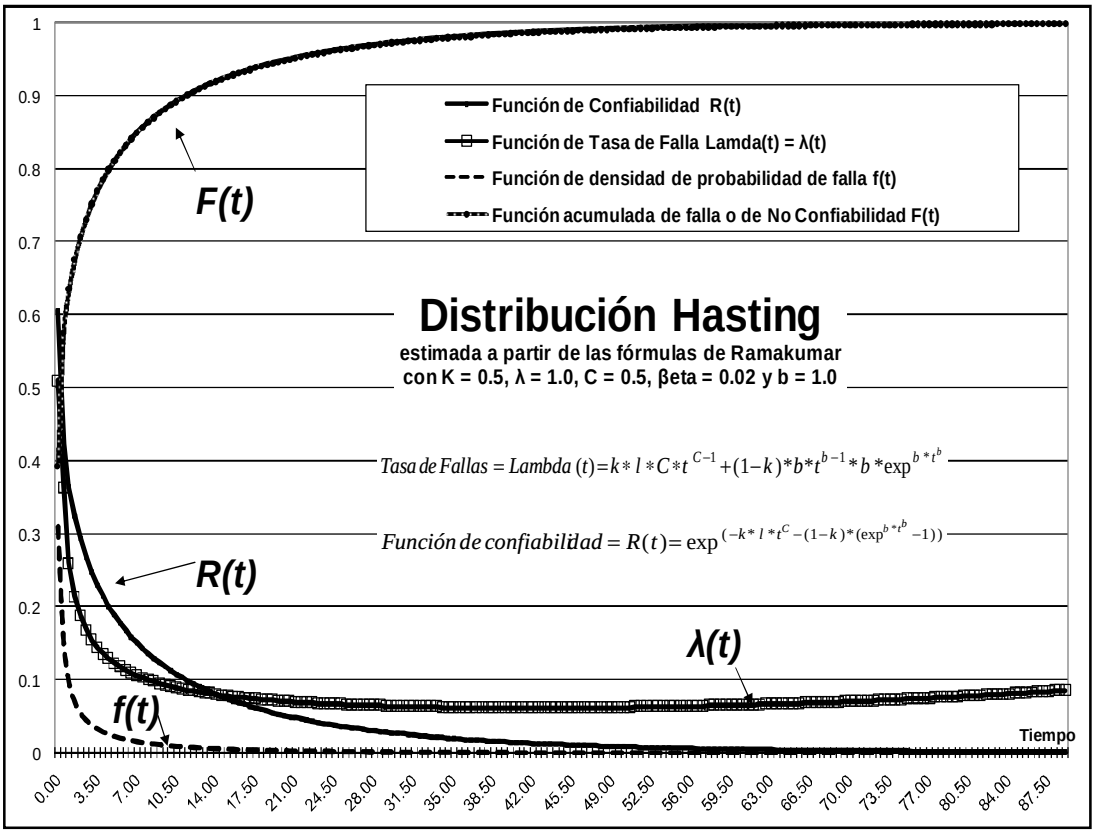


Ilustración 81 - Ejemplo de curvas características de la distribución Hastings con fórmulas de Ramakumar



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4.7.2 Distribución Hjorth de tres fases

El cálculo estadístico de las funciones de falla utiliza además otras distribuciones de mayor complejidad que empiezan a tomar mayor relevancia; dos de éstas son la función *IDB*[195] propuesta por Hjorth y la distribución general. En ambos casos se tiene un cubrimiento total del ciclo de vida del sistema o elemento que se evalúa, al tener las tres fases de la tasa de fallas con alguna de estas distribuciones, o con otras que tengan características similares.

El modelo que presenta Hjorth reconoce que ninguna de las distribuciones normalmente mencionadas proporciona realmente funciones de riesgo en forma de curva de la bañera, por lo cual el sugiere el uso de una distribución *IDB*(Knezevic, 1996). La distribución Hjorth representa el ciclo integral de vida útil del equipo en sus tres fases.

Ecuación 57 - Función de densidad de Hjorth

$$f(t) = [1+s*t]^{-\frac{f}{s}} * \exp\left[\frac{-\left(\frac{t}{m}\right)^2}{2}\right] * \left(\left[\frac{t}{m}\right]^2 + \frac{f}{(1+s*t)}\right)$$

, donde m es el parámetro de posición de la distribución Hjorth, s es el parámetro de vida característica y f es el parámetro de forma.

Con los argumentos de los siguientes vectores:

t es de respuesta.

q es de quantiles

p es de probabilidades

m es de parámetros de situación

s es de parámetros de la vida característica

f es de parámetros de forma.

Con un número n de valores a realizar.

(Hjorth@, 2005)

La distribución general, por su parte, trabaja con cuatro parámetros: dos de escala (*b*, *l*) y dos de forma (b, c); con la selección apropiada de estos cuatro parámetros, la distribución puede modelar el comportamiento de muchos componentes; cuando c = 0.5 y b = 1 adquiere la forma de la curva de la bañera (Ramakumar, 1996), para cubrir de esta manera el ciclo total de vida esperada de un elemento o sistema.

[195] *IDB - Increasing Decreasing Bathtub.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4.8 Resumen del Capítulo 4 – Aplicación CMD - Estrategias y Acciones

Esta sección cuarta, muestra diferentes aplicaciones reales e integrales de una predicción CMD, bajo la metodología puntual, de distribuciones y con series temporales, cubriendo totalmente la promesa de la metodología propuesta Universal de CMD. Muestra a su vez otras distribuciones especiales que complementan el conocimiento de las diferentes opciones de ellas, con sistemas más complejos.

4.9 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 4

- Explique en qué principio se fundamenta el cálculo de valores futuros de los CMD, a partir de los conceptos de MTBMC y MTBMP para Disponibilidades Alcanzada, Operacional y Operacional Generalizada.

- ¿Cómo se estiman y se grafican los valores futuros para Disponibilidades Genérica e Inherente?

- Explique los criterios de la Curva de la Bañera, por medio de los cuales en un cálculo por Distribuciones los valores de los βetas de $MTBM_C$, $MTBM_P$, *MTTR* y M_P, deben estar entre ciertos rangos de valor, para que el ejercicio se acepte como válido y coherente. Use la Curva de la Bañera o de Davies para su explicación y fundamentación técnica.

- Describa la metodología en la cual las Predicciones de Series Temporales se apoyan en el Método Científico para su fundamentación y desarrollo de pronósticos confiables.

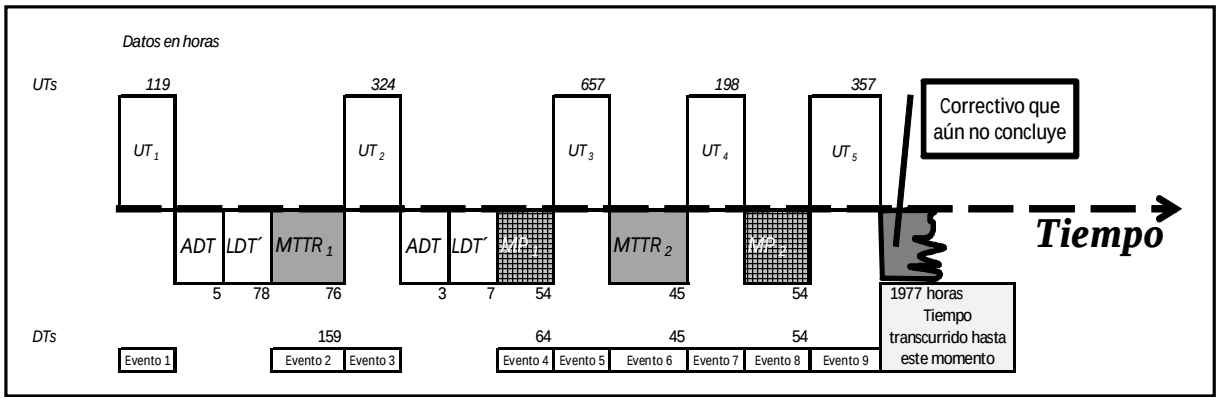
- Defina al menos tres diferencias entre los Modelos Clásicos de previsiones y los Modelos AR.I.MA.

- ¿Cuáles son las principales características de la Distribución Hastings para dos y tres fases? ¿En qué valores de de C y b la distribución Hastings se comporta como la Curva de la Bañera?

- ¿Qué otras herramientas y análisis complementarios recomendaría Ud. para el cálculo, estimación, predicción y graficación de valores y parámetros CMD, en: confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad? Describa técnicamente cada recomendación.

- Explique al menos tres ventajas y limitaciones de realizar cálculos CMD después de cada evento, analizando los diferentes valores y parámetros; frente al método integral total.

Ejercicio 2 - Integral de Capítulo 4



Problema 1- Esquematice los mapas No Planeado (Correctivo y/o Modificativo) y Planeado (Preventivos y/o Predictivos)

Problema 2 - Haga los cálculos puntuales de *MTBF*, *MTTR* y de la Disponibilidad

Problema 3 - Seleccione la Disponibilidad más apropiada y calcule todos los valores correspondientes con el Método Puntual, compare con la anterior y explique el por qué de la diferencia.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Problema 4 - Con la Disponibilidad más apropiada, calcule en cada uno de los eventos, todos los parámetros y los valores correspondientes con el Método de Distribuciones, utilizando los métodos i-kaésimo, Tabla de Rango de Medianas, Benard de Rango de Medianas y Kaplan-Meier; maneje el método de Excel de regresión para el cálculo en la alineación, determine βeta y Eta η en cada caso, calcule los valores necesarios de Disponibilidad y establezca el por qué de las diferencias, con los procesos anteriores. Examine los valores de βeta para $MTBM_C$, $MTBM_P$, $MTTR$, M_P y verifique que estén en la zona correcta de la Curva de la Bañera. Haga las predicciones futuras en horas de $MTBM_C$, $MTBM_P$, $MTTR$ *y* M_P tanto para el cálculo con Distribuciones como para el método puntual, para el 10% del tiempo actual como mínimo.

Problema 5 - Grafique los valores de $MTBM_C$, $MTBM_P$, $MTTR$ *y* M_P, los βetas, los Etas η, $MTBM$, M promedio, ajuste, Error, R, R^2, Bondad de ajuste, etc., para cada uno de los eventos individuales y para el grupal, ilustre cada parámetro, para observar sus tendencias futuras.

Problema 6 - Calcule los valores de $MTBM_C$, $MTBM_P$, $MTTR$ *y* M_P, mediante diferentes Distribuciones y métodos de parametrización y alineación con Programa CD 3, analizando los diferentes resultados obtenidos de cada evento, graficando cada una de las curvas de los valores CMD y de sus parámetros, y comente su ubicación estratégica con la Curva de Davies o Bañera, definiendo las tácticas y acciones a realizar en cada caso acorde a los futuros establecidos y calculados.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

5 - Nivel Instrumental

El desarrollo del Nivel Instrumental, que consta de todos los elementos reales y mentales que se requieren para que el área de mantenimiento funcione[195], pretende mostrar que el grado de evolución en el área de mantenimiento & producción, está enmarcado en los cuatro niveles descritos en la Ilustración 22 - Elementos estructurales de ingeniería de fábricas, donde cada empresa de servicios o de producción en particular, avanza en forma vertical ascendente en las diferentes etapas.

Normalmente el grado de desarrollo implica que la organización se ubique en especial en el momento que atraviesa, en uno de los cuatro niveles (instrumental, operativo, táctico o estratégico), aunque puede tener desarrollos puntuales de los niveles superiores, es decir a manera de ejemplo: puede existir una compañía que en su momento actual se encuentre en el proceso de consolidar sus acciones de mantenimiento, mediante el entendimiento y la diferenciación de las tareas planeadas (preventivas y/o predictivas) frente a las acciones imprevistas (correctivas y/o modificativas), lo cual se tipifica con actividades de organización, planeación y ejecución de acciones de mantenimiento, y en simultáneo puede incursionar en los pasos básicos de implementación de una táctica como el *TPM* o el *RCM* y, eventualmente tener algunos controles incipientes o avanzados de CMD y/o *LCC*[196].

5.1 Objetivo de Capítulo 5

Diferenciar todos los elementos e instrumentos fundamentales de mantenimiento, para que el departamento o área pueda operar, de tal modo que se establezcan los principios y diferencias básicas de cada división (básico, avanzado de orden genérico, avanzado específico y avanzado específico de orden técnico de mantenimiento), con el fin de poder correlacionar este nivel instrumental con los demás y saber los grados de desarrollo mínimos requeridos, para poder implementar total o parcialmente el nivel operativo y/o táctico y/o estratégico; como también las influencias del nivel instrumental en todos los campos y tareas del mantenimiento industrial (véase Ilustración 14 - Enfoque Sistémico Integral Kantiano de Mantenimiento Estratégico) - Nivel 2 – Comprender – Escala de Bloom, Barret y Gagñé (Gagné@, y otros, 2008).

5.2 Introducción a Capítulo 5

La unidad cuatro pretende mostrar una aplicación integral con todos y cada uno de los pasos mínimos requeridos para predecir el comportamiento CMD de un ejemplo real; mediante la utilización y el refuerzo de todos los conceptos desarrollados en los capítulos dos y tres; con el fin de utilizarlos en forma práctica, para pronosticar el comportamiento futuro del mantenimiento y de la operación de las máquinas, líneas de producción o fábricas.

5.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 5 – Nivel Instrumental

Se debe tener un pleno dominio de los conceptos básicos de mantenimiento y producción de los capítulos uno y dos, como de todo el manejo CMD de los siguientes capítulos hasta este, se debe contar con alguna experiencia real en el campo académico o laboral de mantenimiento empresarial, con el fin de visualizar y aplicar de una manera más fluida los conceptos, se debe tener un buen nivel de asociación entre los conceptos de este capítulo y los fundamentos de los otros tres niveles, para poder desarrollar acciones coherentes con los niveles superiores de operación, táctica y estrategia.

5.3 Fundamentos del Nivel Instrumental

El estado natural de cada empresa en particular tiene un desarrollo asociado con alguno de los cuatro niveles y en paralelo puede incursionar en un nivel superior o consolidar uno inferior.

El capítulo suministra los criterios básicos y los fundamentos relevantes que ayudan a tomar decisiones acertadas en cuanto a la selección de elementos vitales de los diferentes niveles de mantenimiento que se desean tener, de

[195] *Indiferente del grado de éxito que tenga, solo que funcione.*
[196] *LCC - Life Cycle Cost*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

tal forma que las disposiciones sean coherentes con la estrategia que se quiere implementar a futuro.

La experiencia de muchos autores y la propia del escritor, muestra que lo tradicional en las compañías es ir desarrollando cada nivel en forma independiente, históricamente acorde a las situaciones del momento y del entorno circunstancial de la empresa, lo cual implica en muchas ocasiones devolverse de nivel, por ejemplo empresas que están en la fase de implementación de alguna táctica, se dan cuenta que en la fase operativa no conformaron un adecuado grupo caza-fallas GCF[197] o no implementaron la metodología *FMECA*, esto las obliga a retroceder en su proceso evolutivo al nivel II anterior para consolidar lo no realizado, pues a manera de ejemplo el análisis de fallas es vital en la mayoría de las tácticas como el *TPM, PMO, RCM & TPM* o *RCM*. Otro caso es cuando se alcanza el nivel cuatro estratégicos, donde hay que medir y se dan cuenta posteriormente, de que el nivel I instrumental no cuenta con un sistema de información en tiempo real que provea costos reales o que permita tomar los tiempos de fallas o reparaciones para poder calcular el CMD.

En otras ocasiones, los directivos de mantenimiento y/o producción conocen a profundidad tácticas como *TPM*, *RCM*, Proactivo, PMO, World Class u otra, y en forma acelerada pretenden su implementación a como de lugar en su empresa, sin auscultar los niveles inferiores (instrumental y operativo) y mucho menos sin evaluar los indicadores CMD de cuarto nivel en su organización; normalmente esto deteriora lo que ya estaba funcionando y se termina desvirtuando la función específica de la táctica seleccionada, lo cual induce a una desorganización total y a que se presenten comentarios como que la táctica X o Y no sirve, etc.

Lo correcto parece ser entonces, hacer desde el inicio o en el momento más adecuado una planeación estratégica (acorde con la misión, visión de la empresa y circunstancias actuales y futuras de la organización) simultánea de los cuatro niveles, en su defecto se debe mantener una constante revisión de todos los niveles de tal forma que haya una estructura lógica y coherente ente ellos (Mora, 2007a).

La recomendación es hacer inicialmente una medición CMD de los principales equipos y líneas de producción de la empresa. Esto permite identificar las curvas de no confiabilidad y de mantenibilidad de las máquinas más relevantes y por ende de la compañía, y una vez conocida la ubicación en la curva de la bañera, se puede entonces decidir adecuadamente el manejo de los instrumentos o elementos de la empresa, el tipo de capacitación del recurso humano propio del área, el software más adecuado, los niveles de inventarios más acertados, el tipo de acciones planeadas o no de mantenimiento que se lleven a cabo, la táctica más adecuada y el nivel de costos *LCC* más apropiado para los indicadores CMD calculados de la empresa y de sus líneas de producción relevantes.

Ilustración 82 - Elementos del nivel instrumental en mantenimiento

- **Sistema de Información**
- **Recursos Humanos Talento**
- **Herramientas**
- **Repuestos**
- **Insumos**
- **Capital de trabajo**
- **Espacio Físico**
- **Tecnología**
- **Maquinaria**
- **Recursos Naturales**
- **Poder de Negociación**
- **Recursos Humanos Carga Laboral**
- **Planeación**
- **Proveedores**
- **Terceros y subcontratación**
- **Otros**

El proceso de identificar los aspectos integrales en forma simultánea, se logra a través de la aplicación de técnicas de rediseño de procesos, como el *Balanced Scorecard* o el de *Quantum Performance*. Esto se debe realizar en paralelo con la medición CMD, de tal forma que identifique una metodología integral de la empresa y una planeación estratégica global de corto, mediano y largo plazo para el mantenimiento de la compañía que se revisa (Mora, 1995); que ayude a decidir el grado de desarrollo ideal en cada nivel, y más aún lo que debe tener el nivel anterior para poder llegar al cuarto nivel estratégico con los elementos adecuados y pertinentes.

Las recomendaciones que se presentan en los siguientes capítulos, más que ahondar en los conocimientos que ya existen en la amplia literatura mundial sobre mantenimiento, pretenden ayudar a conformar estrategias coherentes en los cuatro niveles de mantenimiento, por lo tanto los conceptos que se presentan se van asociando permanentemente a los valores CMD y a las características de los diferentes elementos de mantenimiento en cada nivel.

El nivel instrumental está compuesto por los elementos reales necesarios, para que el área de mantenimiento funcione, se denominan

[197] *GCF - Grupo Caza-Fallas.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

los instrumentos de mantenimiento, son de orden real y entre los más relevantes se pueden enunciar los básicos y los avanzados.

5.4 Instrumentos básicos - Factores productivos de mantenimiento- Nivel instrumental

Son los factores productivos que se manejan en forma habitual en mantenimiento para llevar a cabo las tareas básicas de mantenimiento, las cuales son mantener la funcionalidad de los equipos que se usan para la producción o para la prestación de los diferentes servicios en la empresa; ya sea a través de las reparaciones o mediante las tareas proactivas con mantenimientos planeados.

En cada uno de ellos existen muchos aspectos relevantes que inciden de alguna manera en los niveles superiores, es decir, se requieren ciertas características de manejo y operación de cada elemento para que se adecue a las necesidades de los niveles superiores, por ejemplo el entrenamiento de grupos reactivos de recursos humanos de mantenimiento en el nivel dos de mantenimiento, requiere cierta selección, determinado entrenamiento y un especial manejo del personal apropiado para ello. Un grupo reactivo es muy pertinente en las tácticas proactiva o reactiva y esto está altamente asociado a los valores CMD en empresas donde los valores del *MTTR* son superiores a los del *MTBM*, o donde la cantidad de trabajos de reparaciones supera ampliamente a los planeados. En síntesis se debe ir definiendo cada uno de los elementos reales del nivel instrumental acorde con lo que se desea o se tiene previsto para los niveles superiores.

5.4.1 Sistema de información

La información es el epicentro de mantenimiento, es necesario determinar todos los signos vitales que ocurren para poder consolidar una estrategia adecuada de mantenimiento.

Entre la información que se debe manejar en tiempo real desde el inicio, sobresalen algunos tópicos como:

- Registro de todos los equipos, partes y componentes, al menos hasta tres niveles.
- Generación y control de todas las órdenes de trabajo.
- Desarrollo de solicitudes de trabajos de mantenimientos tanto por usuarios de producción como por parte de cualquier funcionario de la empresa con rangos de validación.
- Planes de mantenimiento de corto, mediano y largo plazo.
- Inventarios y gestión de repuestos e insumos.
- Históricos de consumos, de reparaciones y cambios.
- Solicitudes automáticas de compra cuando se rompa el inventario mínimo, de cualquier repuesto o insumo.
- Generación de pedidos *Push* o *Pull* cuando así se requieran acorde a las mejores prácticas internacionales.
- Salarios e historia de todos los empleados y trabajadores del área.
- Costos de todos los recursos de mantenimiento y producción.
- Costos fijos, variables, financieros y de no confiabilidad de todas las órdenes de trabajo y equipos.
- Registros históricos minuto a minuto de operación y mantenimiento de equipos, de tiempos de fallas y reparaciones, de tiempos administrativos y de demora, tiempos de suministros, tiempos de *Ready Time* o de cualquier otro tiempo pertinente para el cálculo del CMD.
- Costos de operación, de sustitución, de alistamiento y de mantenimiento de equipos, entre otros.
- Índices, rendimientos e indicadores propios o/e internacionales de mantenimiento, operación o ingeniería de fábricas, entre otros.
- Fácil comunicación con el sistema central de información, con otros Softwares de la compañía o de la organización.
- Bases de datos de todos los tópicos señalados.
- Pronósticos de datos, tiempos, repuestos, materias primas o insumos.
- Registro de todos los análisis de fallas, su proceso evolutivo, sus avances y toda la información conexa pertinente.
- Sistemas de cálculo *RPN*, CMD, *TPM*, *RCM*, etc.
- Sistemas de administración, registro, evaluación y gestión de proveedores y de terceros en la operación y gestión de mantenimiento y producción.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Cualquier otro relevante de la empresa en particular.

El sistema de información debe ser flexible y actualizado con el sistema en general que se desarrolla, debe permitir su fácil acceso a través de redes o sistemas a distancia de comunicaciones. Es importante dimensionar desde el principio la magnitud del software y del hardware para no tener los futuros inconvenientes de traslados de sistemas o transporte de información, se le debe apuntar desde el inicio a un sistema robusto que por lo menos soporte el crecimiento de la empresa al menos durante unos quince años. Se debe entender como una herramienta de apoyo al sistema logístico de mantenimiento, pero en sí no puede ser el todo, es necesario tener un proceso sistémico debidamente organizado en los cuatro niveles y después seleccionar el sistema de información a trabajar para soportar el desarrollo natural de la operación y la gestión de mantenimiento; pero no a la inversa, no es recomendable supeditar todo el sistema de mantenimiento y/o producción a las condiciones del sistema de información.

En cuanto a las acciones de mantenimiento y su relación con el *CMMS*[198] debe tener las características de tiempo real como de información veraz en cuanto a insumos, personal y costos, tanto para reparaciones como para actividades planeadas; por otro lado en cuanto a las tácticas posibles de mantenimiento en general es muy recomendable contar con un sistema de información para la gestión y operación de mantenimiento bastante desarrollado antes de iniciar la implementación táctica y mucho más al momento de establecer la estrategia integral de mantenimiento (Mora, 1999).

La elección de un software de mantenimiento exige mucho más análisis del que normalmente parece requerir, su sofisticación y alternativas en el mercado dificultan la selección. Los dos factores que más han contribuido al desarrollo de los Softwares de mantenimiento son: la industria de computación ha madurado lo suficiente para estar a la vanguardia de lo ofrecido y por otra parte el gran desarrollo tecnológico sufrido en las empresas de los clientes ha obligado a las empresas productoras de *CMMS* a ofrecer paquetes muy desarrollados.

Hoy en día se cuenta con bases de datos fáciles de manejar, flexibles, compatibles y rápidas; al igual los Softwares son compatibles con tecnologías masivas como Microsoft.

Los pasos requeridos para seleccionar e implementar programas informáticos de mantenimiento son:

- Definir la magnitud de trabajos, funciones, actividades, equipos, indicadores, flujos cálculos, etc., que se desean controlar en la empresa.
- Determinar los tipos de informes y reportes que se necesitan.
- Mirar qué tipos de ellos ofrecen los *CMMS* que hay.
- Examinar si el software deseado entra en red y es compatible con los sistemas ya instalados en la empresa.
- Concretar con la firma vendedora los entrenamientos requeridos para el personal y la asesoría durante la implementación y puesta en marcha.
- Evaluar las características de expansión de su *CMMS* preferido con relación a sus necesidades futuras.

Las garantías, ampliaciones y las futuras asesorías son primordiales a la hora de seleccionar un sistema de información en mantenimiento. Los *CMMS* proporcionan un soporte gerencial ideal para establecer programas de gestión y control de mantenimiento. Otros criterios que deben influenciar la compra son: experiencia de la casa productora y vendedora, plan estructural de lo que desarrolla el *CMMS*, el tiempo de entrenamiento e instalación, confiabilidad y servicio (Weiss, 1998). La gran automatización industrial y de las actividades de mantenimiento se debe soportar en sistemas *CMMS* (Langan, 1995).

5.4.2 Recursos Humanos – Talento

El personal operativo y administrativo es la piedra angular de mantenimiento, ya que como tal en el enfoque kantiano es uno de los tres elementos básicos[199] del sistema de mantenimiento-máquina-producción y está presente en ambas unidades[200].

---

[198] *Computarized Maintenance Management System – Sistema de Información Integral de Gestión y Operación de Mantenimiento y Producción.*
[199] *Personas - Objetos - Variables.*
[200] *Producción y Mantenimiento.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Entre algunos de los aspectos relevantes que se han de tener en cuenta en el factor humano:

- Búsqueda en escuelas, universidades, centros técnicos, etc. y sitios especializados.
- Selección.
- Enganche.
- Entrenamiento.
- Crecimiento personal.
- Desarrollo.
- Formación para labores específicas correctivas o planeadas.
- Adquisición de habilidades para formar parte de grupos reactivos, caza-fallas o proactivos.
- Remuneración.
- Subcontratación.
- Liderazgo.
- Adiestramiento en una táctica en particular: *TPM*, *RCM*, combinada, Proactiva, Reactiva, *World Class*, etc.
- Sustitución.
- Habilidades y competencias.
- Análisis e interpretación de indicadores y resultados.
- Otros aspectos pertinentes.

En especial es importante resaltar que cada uno de los pasos es fundamental dependiendo de la estrategia, la táctica y las acciones planeadas o no que se deseen en la empresa. Lo ideal es el proceso inverso, el cual consiste en definir los niveles superiores estratégico, táctico y operativo; y dependiendo de esto, entonces sí, empezar a desarrollar una serie de tareas coordinadas con el personal en los aspectos relevantes enunciados anteriormente; pero siempre a la luz de lo definido en la planeación integral.

5.4.3 Herramientas, Repuestos e Insumos

Son los elementos básicos para llevar a cabo las tareas correctivas o proactivas de mantenimiento, deben acomodarse a la estrategia y a la táctica seleccionadas, su manejo debe ser coherente con la política general de gestión y manejo de inventarios (véase sección 5.6.3 Gestión y manejo de inventarios, repuestos e insumos de mantenimiento), en especial en los insumos y repuestos, debe haber un grado de desarrollo avanzado, antes de emprender la realización de procedimientos de mantenimientos planeados y en especial en forma previa a la implementación de cualquier táctica deseada.

Los costos asociados a repuestos e insumos, son un rubro importante dentro de la inversión y de los gastos habituales normales de mantenimiento, se considera que en las empresas que desarrollan políticas de manejo de inventarios pueden alcanzar ahorros superiores al treinta por ciento mensual, en el capital destinado a ello.

5.4.4 Capital de Trabajo - Espacio Físico – Tecnología – Maquinaria - Recursos Naturales - Poder de Negociación - Recursos Humanos Carga Laboral – Planeación

Son considerados los factores básicos requeridos para lograr la función primaria del departamento de mantenimiento en las empresas de servicio o producción, fundamentalmente es una entidad de servicio que se diferencia de las de operación, debido a que otorga un apoyo logístico para que las áreas productivas puedan cumplir su función de agregar valor a los procesos de servicio o producción de bienes tangibles; la forma en que se utilicen y se manejen los factores productivos, permite medir el grado de calificación en cuanto a eficacia, eficiencia y efectividad del mantenimiento; lo que a su vez define los niveles de productividad de mantenimiento y los de competitividad de la empresa donde se estructura el área de mantenimiento.

La relación entre mantenimiento y producción en aras de las máquinas, se gobierna en buena medida por las

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

reglas que se definen en la Función Macroeconómica de la Producción[201], establecida por David Ricardo en el siglo XVIII donde se definen las normas que rigen las reglas de juego entre las dos áreas y las de la gestión de cada una de ellas(Ricardo, 1817) (Clement, y otros, 1984).

5.4.4.1 Mantenimiento: función de producción

La evolución estratégica de mantenimiento depende de su origen, el cual es el área de producción; su inicio data desde la operación (manufactura) y en esta idea se apoya todo el desarrollo de su actividad, por lo cual se hace necesario revisar el tema de la función macroeconómica de la producción que es la que gobierna todas las actividades de la operación. La estructura básica de manufactura se basa en la teoría de los factores productivos de David Ricardo, en el cual se enuncian los principios que gobiernan la función de producción. Citan Navarro y otros autores: "...cada tipo de empresa requerirá un servicio de mantenimiento adecuado a su Producción, pero en ningún caso separado de él...." (Navarro, y otros, 1997).

La revisión investigativa e histórica en las empresas revela las diferencias entre los diseñadores de equipos (ingeniería de diseño), los usuarios (AOD= aprovisionamiento y/o operación y/o distribución, producción) y los encargados de sostenerlos (mantenimiento), pero coincide en que todos deben buscar su máxima eficiencia y disponibilidad. La clara relación entre ambos departamentos se concreta en la disponibilidad de los equipos.

El objetivo de mantenimiento frente a producción es claro, el cual consiste en mantener en óptimo estado el parque industrial. Si por producir se entiende como la máxima explotación de los equipos para cumplir los planes de manufactura, por mantenimiento se debe pensar como la máxima funcionalidad y disponibilidad de las máquinas.

La fabricación y el mantenimiento son actividades duales y complementarias, lo cual se conceptúa por la alta relación entre ellas (Sourís, 1992). El servicio de mantenimiento está enmarcado dentro de una empresa en la función de producción, la cual logra la más alta productividad mediante el uso eficaz de los factores productivos (Rey, 1996).

5.4.4.2 Función macroeconómica de la producción

La forma en que se utilicen y se combinen los factores productivos incide en la eficiencia y eficacia de la generación de bienes y servicios. David Ricardo diferencia las etapas de esta combinación de factores productivos, determinando tres zonas básicas: marginal creciente, marginal decreciente y de ineficiencia.

5.4.4.3 Cantidad de servicios (o de productos), Servicios Promedio y Productividad

La relación de uso de un factor está condicionada a su productividad y al producto promedio en cualquier instante por el comportamiento de la siguiente ilustración. Entendiéndose PP (Productos Promedio) o SP (Servicios Promedio) como una medida puntual y estática en el tiempo, a diferencia de la productividad que relaciona dos estados del tiempo y por ende se considera una medida dinámica mucho más importante que el SP o PP (Ricardo, 1817).

[201] *También denominada Función Macroeconómica de la Productividad.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ecuación 58 - Cantidad de Servicios, SP Servicios Promedio y Productividad de Servicios para entidades de servicios de mantenimiento

$CS = \text{Cantidad de Servicios de Mantenimiento realizados}$

$FP = \text{Cantidad de Factores Productivos usados para realizar un volumen determinado CS de tareas correctivas o proactivas de mantenimiento}$

$$\text{Servicios Promedio} = SP = \frac{\text{Cantidad de Servicios de mantenimientos realizados}}{\text{Cantidad de Factores usados}} = \frac{CS}{FP}$$

$$\text{Servicios Promedio, es la primera derivada de Cantidad de Servicios contra los Factores Productivos } SP = \frac{d\,CS}{dFP}$$

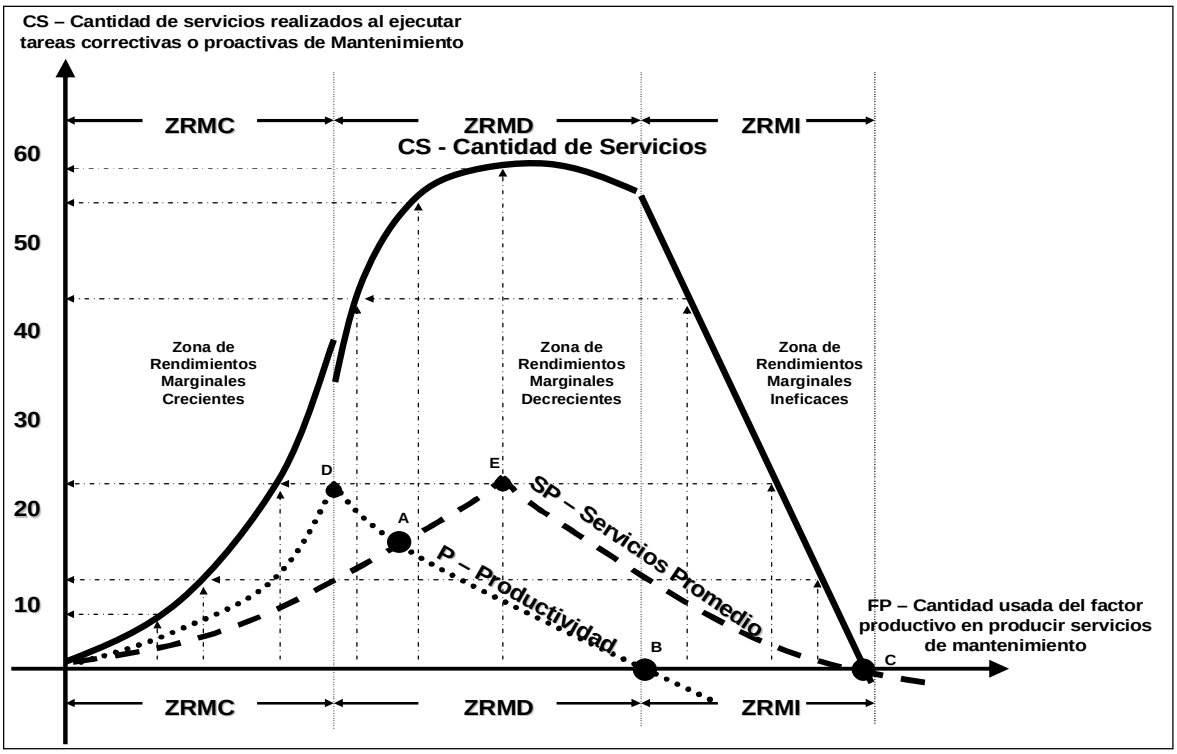
Productividad en servicios es la relación entre el incremento logrado en la cantidad de servicios de mantenimiento realizado y el incremento específico en la cantidad de los factores productivos utilizados para generar esos servicios de mantenimiento (Mora, 1999), en dos estados subsecuentes de tiempo (t_f estado final de referencia y t_i estado de referencia inicial).

$$\text{Productividad de Servicios} = \frac{\Delta_i^f \text{ Cantidad de Servicios}}{\Delta_i^f \text{ Cantidad de Factores Productivos}} = \frac{CS_f - CS_i}{FP_f - FP_i} = \frac{d\,SP}{d\,FP} =$$

es la segunda derivada de la cantidad de servicios promedios realizados contra los Factores Productivos usados en esas tareas de mantenimiento

$$\text{Productividad de Servicios} = \frac{d^2\,CS}{d^2\,FP}$$

Ilustración 83 - Curvas de Cantidad de Servicios, Servicios Promedio y Productividad para un FP



En la ZRMC cada factor productivo que ingresa produce más servicios que el anterior, esto se debe a la especialización del trabajo, luego en la segunda zona de ZRMD cada factor productivo que se adiciona genera

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

menos servicios que el anterior pero de todas formas la CS se incrementa, y por último en la ZRMI cada FP adicional hace que disminuya la cantidad de servicios, algo así como consumirse el inventario en producción.

La curva de servicios promedio SP se vuelve máxima (punto E) cuando CS está en el punto de producción máxima de servicios, y se vuelve mínima (punto C) cuando CS es cero o sea en el mínimo nivel de servicio.

La productividad P toma como valores, máximo y mínimo respectivamente los dos puntos correspondientes a los cambios de curvatura de CS, que ocurren entre las dos fronteras de las tres zonas, así: en el punto D (cuando CS pasa de creciente a cóncava, entre las zonas ZRMC y ZRMD) y en el punto B (al pasar CS de cóncava a curva de pendiente negativa en ZRMI, entre la zonas ZRMD y ZRMI), los valores de referencia de los cambios de curvatura de las tres curvas (Clement, y otros, 1984) (Bohan, 2003).

5.4.4.4 ¿Cuál es la cantidad óptima a usar en un Factor Productivo?

Para seleccionar el punto ideal de la cantidad de FP a usar, para realizar las tareas correctivas y proactivas de mantenimiento, se deben considerar los siguientes puntos en cada una de las zonas:

- La ZRMI se descarta dada su condición de productividad negativa y la tendencia de SP a cero.
- Es indudable que parece ser que la mejor zona es ZRMC, pero esta a pesar de que cuenta con la productividad P más alta, no alcanza el mayor SP y la CS llega a un tope máximo de servicios por lo cual se descarta.
- Ya que en la ZRMD es posible lograr Cantidades de Servicio CS más altas que en la ZRMC, a pesar de que en la ZRMD al introducir más FP se reduce la cantidad de servicios CS marginales con relación al anterior FP, el total de CS aumenta, de donde se deduce que el punto ideal está ubicado en la ZRMD en donde al incrementar la cantidad del Factor Productivo FP se logra que el producto total CS aumente. En esta zona la curva de productividad P empieza a descender y la SP asciende; aquel punto donde el incremento de la productividad sea igual al Servicio Promedio SP es el punto ideal de la cantidad a usar de FP para lograr la CS deseada, el cual se da en el punto A de la ilustración anterior.

De lo anterior se desprende que el punto ideal es aquel donde se cumple que:

Ecuación 59 - Punto ideal donde Servicios Promedios sea similar a Productividad.

$$Servicios\ Promedio \cong P \cong \frac{d\,CS}{d\,FP} \cong \frac{d\,SP}{d\,FP} \cong Productividad\ para\ el\ mismo\ Factor\ Productivo$$

El sitio óptimo donde se deben usar los factores productivos en forma individual, es cuando se cruzan las curvas de productividad P y servicio promedio SP, esto ocurre cuando el último incremento del factor productivo aumenta la cantidad total de servicios de mantenimiento en la misma medida del servicio promedio que se tiene en ese instante, en un argot más sencillo es cuando el último trabajador que ingresa (de izquierda a derecha, si se trata del factor productivo recurso humano - carga laboral) incrementa la producción total de servicios en el mismo nivel del promedio que se tiene.

En todo instante se debe conservar la productividad P por encima del Servicio Promedio SP, el punto máximo permisible es cuando son iguales.

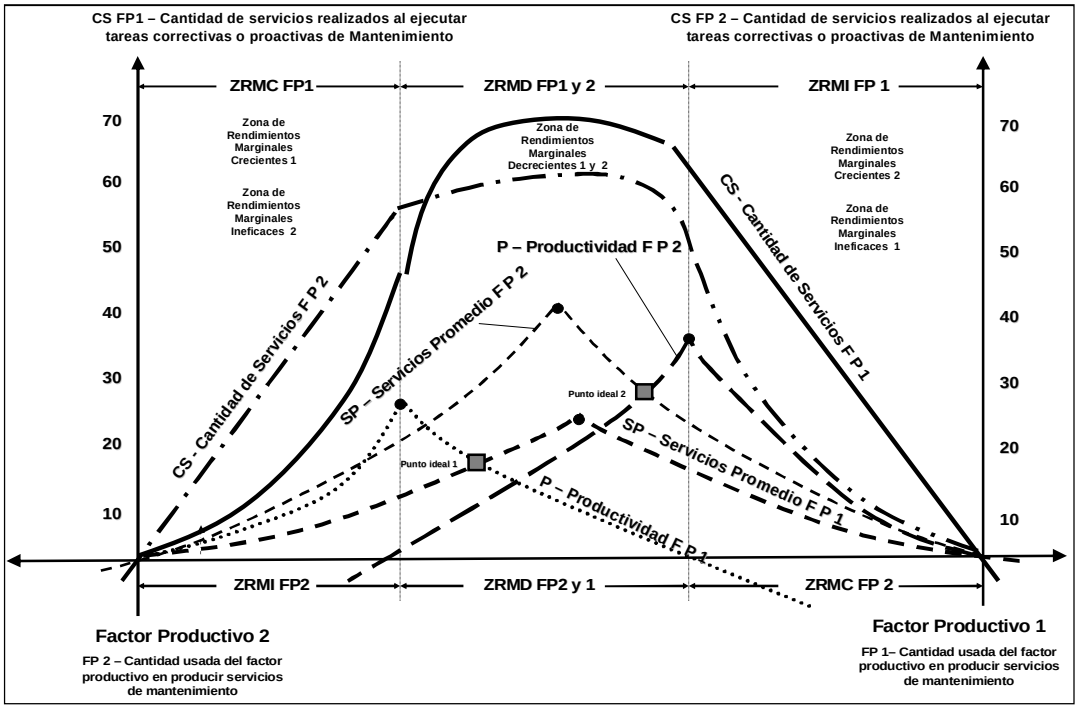
5.4.4.5 Parámetros de manejo cuando se utiliza más de un Factor Productivo

La construcción de las curvas de CS, SP y P se logra en forma similar al de un factor, solo que en dos se esbozan en dirección contraria (uno de izquierda a derecha y el otro a la inversa de derecha a izquierda).

En la siguiente ilustración se denota que en ambos casos de FP1 y FP2, el punto óptimo se encuentra en la zona de rendimientos marginales decrecientes ZRMD; de donde se desprende que para encontrar la combinación óptima de Factores Productivos en la prestación de servicios correctivos o proactivos de mantenimiento se deben acercar los puntos ideales de FP1 y de FP 2 de tal forma que se cumplan las siguientes aproximaciones:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 84 - Curvas de Cantidad de Servicios, Servicios Promedio y Productividad para dos FP



Ecuación 60 - Punto óptimo de gestión de mantenimiento instrumental para dos Factores Productivos FP 1 y FP 2

$$\text{Servicios Promedio } FP1 = \text{Servicios Promedio } FP2 =$$
$$\text{Productividad } FP1 = \text{Productividad } FP2$$

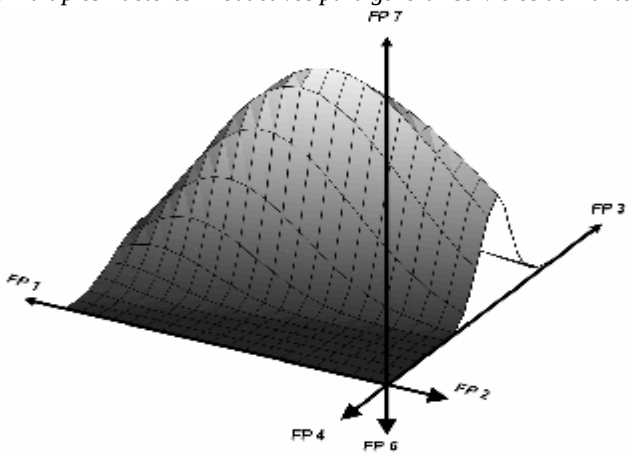
Al igual si se extrapola a varios Factores Productivos, se obtienen aproximaciones similares:

Ecuación 61 - Punto óptimo de gestión de mantenimiento instrumental para dos Factores Productivos FP 1 y FP 2

$$\text{Servicios Promedio } FP1 \cong SPFP2 \cong SP\,FP3 \cong \ldots\ldots = SPFPn \cong$$
$$\text{Productividad } FP1 \cong FP2 \cong \ldots\ldots \cong FPn$$

En los casos de múltiples Factores Productivos se forma lo que se denomina la superficie macroeconómica de la producción o el servicio, bajo las leyes de David Ricardo.

Ilustración 85 - Manejo de Múltiples Factores Productivos para generar servicios de mantenimiento



(Mora, 2007b)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Cuando se manejan varios FP, se logra que la productividad de cada uno de ellos sea similar entre sí y aproximadamente idénticas a cada uno de los Servicios Promedios en cada uno de los FP; se desprende del análisis de la Función Macroeconómica de la Producción aplicada a Servicios que se debe procurar un manejo similar y adecuado en cada uno de los diversos Factores Productivos que se manipulen, especialmente en mantenimiento se debe tener un equilibrio en el manejo productivo de ellos y en la productividad individual que tienen y en la grupal que genera el manejo integral de todos ellos.

Todos los conceptos revisados para la generación de servicios son válidos y exactamente iguales para la producción de bienes tangibles; de esta forma se dejan conceptualmente explicados los fundamentos que priman, las reglas que imperan y el comportamiento habitual de las funciones de mantenimiento y producción, todo enmarcado en el enfoque sistémico kantiano y siguiendo los principios básicos de la productividad y de la función macroeconómica de la producción.

Esta conducta se puede extrapolar a los tres factores productivos enunciados por Ricardo, es evidente que cuando él existe en los siglos XVII y XVIII en Inglaterra, el mundo industrial no tiene la gran complejidad y dimensión de los parámetros que influyen directamente en la producción de una empresa y del producto bruto total de un país, esto indica que para actualizar dichos conceptos se deben ampliar los factores productivos.

La productividad en el mantenimiento está más asociada a indicar el número de servicios prestados por unidad de tiempo, por lo cual han de tenerse en cuenta no solo los parámetros de recursos humanos y la duración de los trabajos, sino que es indispensable darle una mayor dimensión teniendo en cuenta otros indicadores de productividad como: disponibilidad del parque industrial, costos integrales de mantenimiento por servicio y el número de cumplimientos de los servicios.

En general se deben constituir indicadores de medición para poder definir los niveles deseados y reales de productividad a obtener (Mora, 1999). Entre otros factores productivos a medir permanentemente se deben presentar: disponibilidad, fiabilidad, calidad de los trabajos, paradas ocasionadas por fallas en las refacciones, rapidez, seguridad, motivación del personal, responsabilidad, entre otros (Navarro, y otros, 1997).

5.4.4.6 Factores productivos modernos (para mantenimiento y producción)

La circunstancia de que Ricardo con sus tres factores productivos no cubre conceptualmente las labores modernas de mantenimiento ni de producción, obliga a ampliar esta gama de elementos de tal forma que permitan un estudio más desagregado y profundo de la actividad de mantenimiento.

Los factores productivos ampliados cubren una mayor dimensión posible de las actividades inherentes a la gestión de producción y mantenimiento, es de anotar que deben manejarse cada uno de ellos por separado y en conjunto con las directrices de productividad, eficacia y eficiencia conocidas.

Entre los recursos básicos, especializados, genéricos y avanzados (Porter, 1999), se pueden describir:

- K - Capital (original de Ricardo): se refiere a todos los recursos económicos necesarios para adquirir insumos, equipos, herramientas, tecnologías, documentos, etc. y pagar los costos variables de todos los factores, sufragar los costos fijos de la organización. Denota todos los recursos financieros utilizados en la producción o el mantenimiento.

- N - Recursos Humanos[202] (original de Ricardo) o Talento Humano: es el capital más valioso de la gestión de mantenimiento, está asociado con todas las personas de alto, medio y bajo nivel que laboran en el área; incluye su nivel salarial, su motivación, su entrenamiento, su capacitación, sus conocimientos, sus habilidades y competencias, su actuación en grupo y demás variables relacionadas con todos los funcionarios pensantes y laborales de mantenimiento. Citan Navarro y otros que "... la técnica ha permitido sustituir tareas de producción que habitualmente realizaban las personas, por procesos automáticos. Es muy importante el trabajo en equipo y las funciones matriciales por procesos en el trabajo humano de mantenimiento. En mantenimiento, sin embargo, la técnica no ha podido

[202] *Se hace referencia a dos tipos: el del talento que se refiere a trabajos de índole intelectual o analítico y el de carga laboral, asociado más a cargos de operación, mantenimiento y/o esfuerzo físico.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

eliminar al mismo nivel la componente humana en reparaciones....” (Navarro, y otros, 1997)[203].

- RN - Recursos Naturales (original de Ricardo): son los recursos que se tienen a la mano en las cercanías físicas y geográficas de la empresa. Este ítem genera muchas oportunidades competitivas cuando se dispone de ellos en forma natural o cuando hay que conducirlos hasta la fábrica. Incluye leyes de contaminación, conservación ecológica, manejo del agua y la luz, energía, etc.

- T - Tecnología: es el conjunto de conocimientos técnicos, habilidades y competencias desarrollados por mantenimiento y la empresa, incluye también los adquiridos por compra o por franquicia, denota la capacitación y el grado de evolución intelectual de la organización, sus competencias y productos esenciales y todo lo relativo a la actividad científica de mantenimiento con las demás divisiones de la compañía.

- P - Planeación: es la capacidad que tiene mantenimiento y la organización para diseñar su futuro y alcanzarlo, está referido a las metas, a los deseos que se anhelan lograr en el presente y en el futuro.

- PN - Poder de Negociación: es el nivel o grado que alcanza la empresa para llevar a cabo negocios con sus clientes internos, externos, con sus proveedores intrínsecos o exógenos, es en síntesis la capacidad para relacionarse como organización con su medio interno y externo.

- V - Espacio Físico - Volumen: es la dimensión física de las instalaciones donde interactúa mantenimiento con los equipos y servicios que desarrolla, para sus clientes internos o externos.

- I - Informática o Sistemas de Información: es el manejo estructurado de la información y de los datos que administra sobre equipos, elementos, repuestos, servicios, planos, datos técnicos en general, *CMMS*, etc., propios o relativos a sus clientes, proveedores o de su entorno (Mora, 1990c).

La forma en que se manejen y operen los ocho factores productivos precisan de alguna manera los niveles de eficacia, eficiencia y efectividad de los instrumentos básicos de mantenimiento; al igual que se definen los niveles de productividad y competitividad que se pueden alcanzar acordes a la gestión y operación realizada en la fase instrumental del enfoque kantiano de mantenimiento (Mora, 1998a)(Mora, 1990) (Porter, 1999).

5.4.4.7 Términos de medidas básicas del nivel instrumental de mantenimiento.

La gestión y la operación de mantenimiento se rigen por normas y evaluaciones, que en ocasión confunden por su significado similar, por lo cual es necesario identificar algunos significados de estas medidas básicas de la fase instrumental de mantenimiento.

La forma en que se administren los instrumentos básicos y avanzados de mantenimiento está definida por el alcance de sus metas y por los recursos requeridos para alcanzarlas; de aquí que es relevante definir en términos de mantenimiento (adaptadas de Enrique De Miguel (De Miguel, 1990)):

- ***EFICACIA: realizar las tareas correctivas o proactivas de mantenimiento.***

- ***EFICIENCIA: alcanzar las metas definidas como tareas de reparaciones o de mantenimientos planeados, mediante el empleo de los recursos o factores productivos asignados (en cantidad limitada), para ello.***

- ***EFECTIVIDAD: se define como obtener las diferentes metas propuestas, con los recursos productivos asignados a tal fin, en el menor tiempo permisible, con la mayor oportunidad y rapidez, al menor costo posible, con la máxima calidad y competitividad, alcanzando la mayor satisfacción del cliente, con la más alta productividad, logrando la máxima***

[203] *Se recalca la relevancia de este factor productivo en la gestión de mantenimiento, sus grandes cambios obligan a tener que profesionalizar cada día más el recurso humano (talento y carga laboral) mediante la capacitación en ciencia y la adquisición de habilidades y competencias..*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

rentabilidad, con los mayores CMD posibles, acercándose a los estándares internacionales, etc.; en síntesis es la medición del éxito integral de alcanzar una meta.

Los diferentes niveles de medidas se clasifican en categorías como:

- Índices: se refiere a indicio o señal de algo. Se define como la evolución de una cantidad, se denota indicio como la señal o signo aparente y probable de existencia de algo real o supuesto; seña o vestigio de algo, definido como la relación entre varios números calificativos de algo (Grijalbo, 2000). Se podría aproximar a la valoración con un número o valor en sí, que revela la señal o comportamiento de algo.

- Rendimientos: Un sistema empresarial o un proceso del mismo, requiere el reconocimiento de un sistema que utiliza un modelo de dirección y de gestión del rendimiento, como la forma de medir su grado de éxito de la función o misión que desempeña. El rendimiento empresarial (*Performance*) de la organización está ligado al producto, bien, servicio o utilidad que genera su intervención. Está influenciado básicamente por dos factores: el acierto que se asocia a la eficacia estratégica en términos de referencia empresarial (Mercadeo, Recursos Humanos y Físicos, etc.) y la capacidad como la correcta orientación de las disponibilidades productivas internas sobre los clientes que se atienden convirtiéndose en valor agregado competitivo y no comparativo. Rendimiento es la eficiencia de sus procesos y subprocesos internos.

- Indicadores: es una magnitud o expresión cuantitativa del comportamiento de varias variables o de los atributos de un producto o servicio en proceso de una organización. La magnitud del indicador sirve para compararla con un valor o nivel de referencia según sea el caso. Mide un conjunto de variables asociándose entonces a organización o conjunto de empresas o procesos.

Desde el punto de vista de realizar las tareas de reparaciones o la realización de acciones de reparación o tareas proactivas, en mantenimiento, se deben precisar los conceptos de:

- Actividad: es algo que hace un (o varios) ser (es) humano (s) sobre un objeto o cosa, es la unidad más elemental y simple de una empresa (una tarea de mantenimiento (como soldar dos metales) o una función básica de producción (por ejemplo transportar un producto)).

- Proceso: es un conjunto secuencial, lógico y organizado de actividades, con un fin muy preciso.

- Macro-proceso: u organización, es un grupo orgánico de procesos, ligados entre sí por una meta o característica particular.

El nivel de desarrollo de mantenimiento o producción (o de una empresa), se puede medir en términos de espacio y de tiempo (enfoque kantiano), así:

- Productividad: es la valoración que permite establecer si las metas propuestas se han logrado en el transcurrir del tiempo (es una medición consigo mismo), en referencia de tiempos diferentes en el mismo espacio.

- Competitividad: es la comparación evaluativa del logro de las metas con otras entidades (locales, regionales, nacionales o mundiales) en el mismo tiempo, pero en diferentes espacios.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 86 - Correspondencia y analogía entre los diferentes parámetros de medición de la gestión y operación de mantenimiento (de producción o de una empresa)

	Analogía, correspondencia y similitud vertical		
Aspecto	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Clasificación	Índice	Rendimiento	Indicador
Función Macroeconómica de la Productividad	CS - Cantidad de Servicios	SP - Servicios Promedio	P - Productividad o Competitividad
Medición	Eficacia	Eficiencia	Efectividad
Empresarial	Actividad	Proceso	Macroproceso u Organización Empresarial

La utilización de cada categoría posible de evaluaciones, depende en sí de lo que se desee medir; lo que sí hay que tener en cuenta en el vocablo y en el argot que use son las corresponsalías entre ellas, esto permite diferenciar y aclarar especialmente los parámetros correctos a evaluar.

Existen procedimientos que se apoyan en los instrumentos básicos de mantenimiento, fundamentalmente utilizados para eliminar las fallas, para mejorar los procesos de reparaciones o de mantenimientos planeados, para optimizar los factores productivos, para minimizar costos de manejo y operación, para jerarquizar y priorizar las actividades de mantenimiento y/o producción, etc., a estos instrumentos se les considera como metodologías con un grado de desarrollo más alto dentro del nivel instrumental de mantenimiento, bajo una estructura sistémica y kantiana de mantenimiento.

5.5 Instrumentos avanzados genéricos de mantenimiento - Nivel Instrumental

Las herramientas especiales que en forma habitual se utilizan en mantenimiento para el mejoramiento de las técnicas de manejo de los instrumentos básicos como de los factores productivos, oscilan alrededor de los objetos básicos de estudio y del tratamiento de mantenimiento en cuanto a fallas y reparaciones (o mantenimientos planeados).

A efectos de presentación, se clasifican los instrumentos avanzados de mantenimiento, en dos niveles: unos genéricos de aplicación ilimitada y otros específicos para usos más especiales.

Ilustración 87 - Instrumentos básicos y avanzados

(Mora, 2007b)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Entre otras, existen técnicas y herramientas avanzadas genéricas que se usan actualmente en la gestión y operación del mantenimiento, como también hay otras específicas que son aplicables; es así como por ejemplo el análisis de fallas *FMECA* o análisis de fallas se centra en el control de calidad para la erradicación de éstas, al igual la gestión de *stocks*[204] y el manejo de inventarios de repuestos e insumos de mantenimiento se preocupa por los materiales que se requieren en las reparaciones (y/o en las tareas proactivas), así mismo las 5S procuran mejorar las acciones de la reparación y optimización de los utensilios que se usan en mantenimiento, de la misma manera el *TQM*[205] y el *TQC*[206] propenden la calidad integral tanto en los bienes y servicios que se generan en producción como en las condiciones de los equipos que los fabrican, como también el *RPN* procura jerarquizar las tareas proactivas y de reparaciones.

En general es muy importante el rol que juegan las herramientas avanzadas de mantenimiento en los niveles superiores (operacional, táctico y estratégico) de mantenimiento, bajo el enfoque sistémico kantiano, ya que son las bases de algunas acciones y tácticas particulares de calidad en la operación de mantenimiento.

Si la función de mantenimiento tiene como objetivo garantizar la disponibilidad de los equipos industriales cuando estos sean requeridos, adquiere dos dimensiones: una en términos de que los elementos físicos que conformen el cuerpo de la máquina se mantengan en buen estado (tratando de contrarrestar la acción del uso, desgaste o envejecimiento) y el otro fin es que el conjunto de elementos que conforman el equipo cumplan cada uno y en grupo la función para la cual fueron diseñados.

Los instrumentos avanzados de mantenimiento se pueden analizar bajo varios puntos de vista, como por ejemplo, desde la óptica de los efectos que las fallas ocasionan en los bienes y servicios que se elaboran, en el proceso de fabricación y en los equipos de producción, y por otro lado desde la visión del tratamiento de la falla en sí para su ulterior eliminación o control.

Los efectos de las fallas en los procesos de fabricación, bien se pueden estudiar desde el impacto de la calidad en el mantenimiento y en la producción. La calidad se convierte en una excelente estrategia para aumentar la productividad, la rentabilidad y la competitividad de las empresas; el rol que juega mantenimiento en la actualidad en la calidad es muy relevante donde, dado el incremento en los procesos de automatización, robotización y mecanización en los equipos se puede afirmar que las acciones de mantenimiento en este campo se evidencian en tres aspectos: cantidad, calidad y costos.

Las actuaciones de mantenimiento están asociadas a la calidad misma de los trabajos que realizan y su impacto en las características físicas y funcionales de los equipos que se mantienen, y estas a su vez inciden en la disponibilidad, que es el indicador máximo de la relación producción-máquina-mantenimiento; como también es notorio resaltar que las acciones de mantenimiento inciden directamente en la calidad de los productos que se fabrican y de los servicios que se prestan (por ejemplo un equipo de un hospital en la sección de cuidados intensivos tiene un alto impacto en el cuidado de los pacientes y es muy importante para la calidad del servicio de salud prestado).

La función primaria de producción es generar bienes y servicios, como también una de sus funciones secundarias es demandar los servicios de mantenimiento para los equipos; esta función secundaria de producción es la función primaria de mantenimiento.

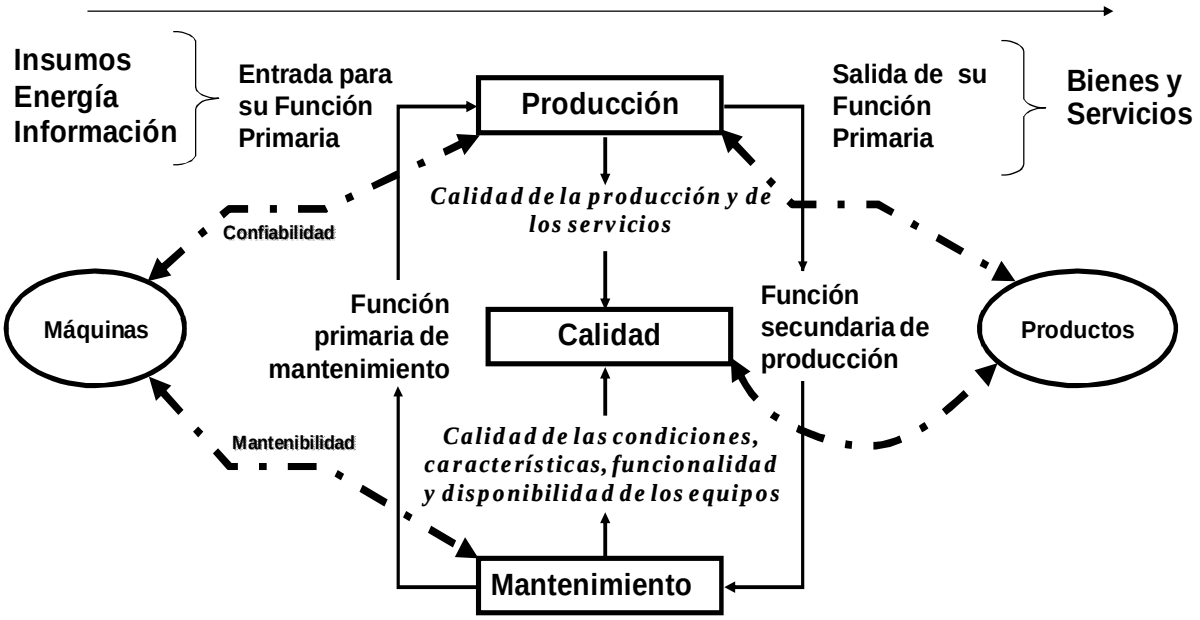
Ambas entidades operan en paralelo en un sistema empresarial, por lo cual los esfuerzos de mantenimiento afectan directamente la producción en cuanto a calidad y cantidad; esto pone de manifiesto la importancia de tratar de establecer la estructura que relaciona a mantenimiento y calidad, y por ende su influencia en la producción de bienes y servicios, bajo el enfoque sistémico.

---

[204] *Stock Cantidad guardada o almacenada.*
[205] *TQM – Total Quality Management – Gestión Total de la Calidad o considerado en ocasiones como Manufactura bajo Calidad Total.*
[206] *TQC – Total Quality Control – Control Total de la Calidad o también Control de Calidad Total.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 88 - Relación entre mantenimiento, calidad y producción



Los autores Ben-Dayay y Duffuaa(Duffuaa, y otros, 1995), presentan dos modelos posibles para relacionar a mantenimiento con calidad:

- Modelo de la imperfección de mantenimiento.
- Modelo de la aproximación de Taguchi.

El primero de ellos se basa en el concepto de la imperfección del mantenimiento, el cual consiste en que después de cada intervención de una tarea planeada de mantenimiento (preventiva y/o predictiva) la tasa de fallas se altera[207], lo que afecta directamente la calidad de los productos y las inspecciones a realizar. De esta forma la integración de las áreas producción-mantenimiento-calidad se logra a través de planes de mantenimientos planeados y su influencia en la calidad de los productos (Duffuaa, y otros, 1995).

.

El segundo modelo está basado en las aproximaciones de calidad de Taguchi, según el cual las desviaciones de calidad en las características de los servicios generados y productos desarrollados (frente al estándar) se ven afectadas por las tareas proactivas de mantenimiento. Taguchi desarrolla modelos que simulan estas situaciones y permiten optimizar los recursos de calidad-mantenimiento-producción, en términos de la minimización de las pérdidas de calidad sufrida por los bienes y servicios creados durante la operación fabril como consecuencia de las tareas de mantenimiento (Taguchi, y otros, 1989) (Duffuaa, y otros, 1995), maximizando la disponibilidad de las máquinas (Sourís, 1992).

El modelo PQCDSM (Producción, Calidad, Costos, Demoras, Seguridad y Motivación) cuanto más avanza la automatización de equipos, más influencia tiene sobre la disponibilidad de los equipos; los diferentes modelos japoneses más que ser metodologías que involucren tecnologías avanzadas, son técnicas que procuran hacer bien las cosas básicas y los principios fundamentales de todos los procesos productivos, con un alto dominio del conocimiento y de los pasos requeridos para el éxito en términos de calidad, producción y mantenimiento. El objetivo primordial de la calidad en el mantenimiento es asegurar la disponibilidad (Mora, 1999).

La utilización de los conceptos, parámetros y métodos de calidad para elevar el nivel de servicio al cliente en mantenimiento involucran el uso de términos como la Terotecnología, calidad integral, metodologías modernas

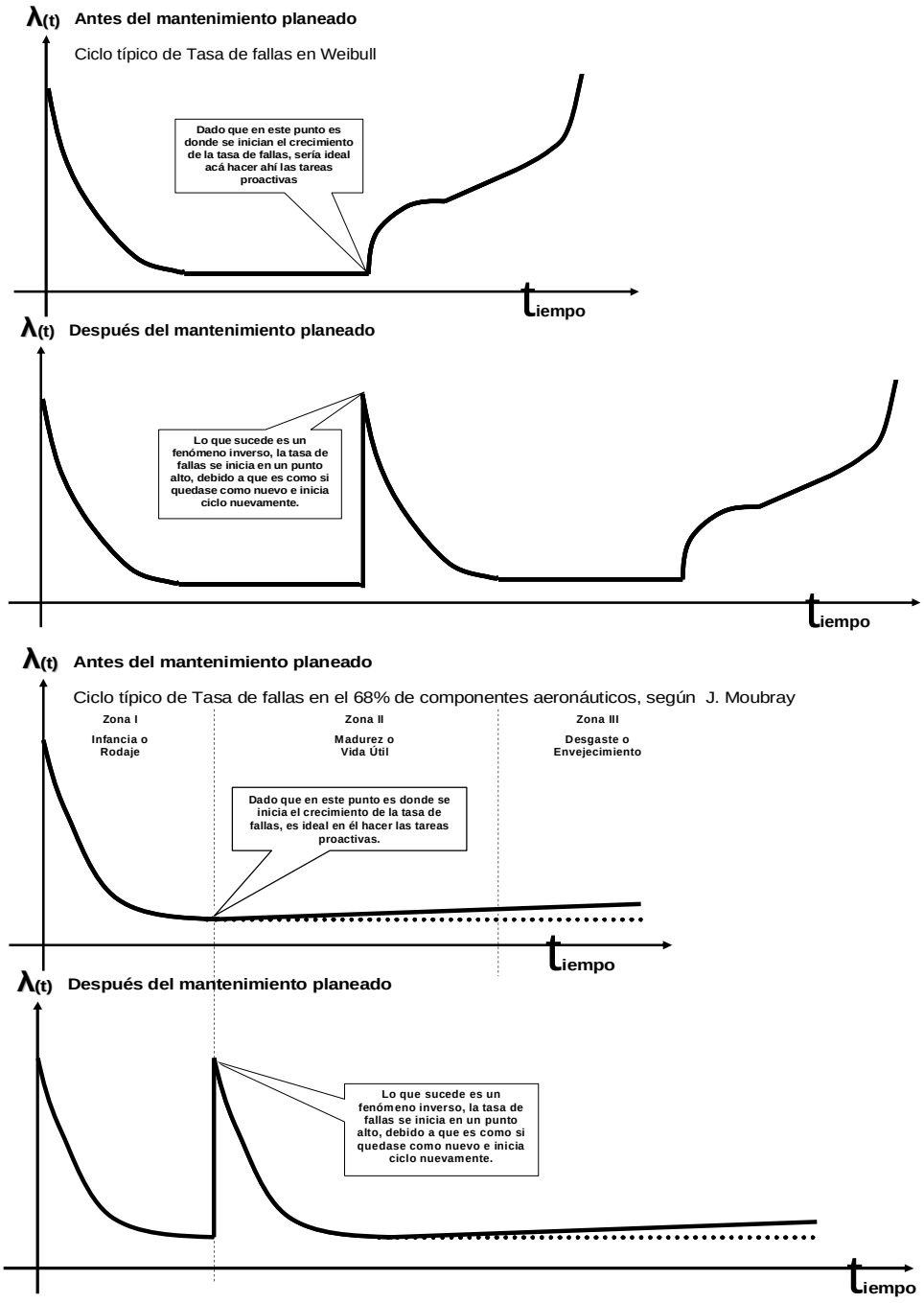
[207] *No siempre es considerado esto como una ventaja, ya que en ocasiones según John Moubray, es más perjudicial hacer acciones de mantenimiento planeado dependiendo del momento en que se encuentre el ciclo de vida acorde a la tasa de fallas (según Weibull), pues en vez de disminuir la rata de fallas aumenta, se presentan dos casos de estos en la Ilustración 65 - Momentos perjudiciales de hacer mantenimientos tipo overhaul planeados o no en algunas formas de ciclo de vida típicos de Weibull.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

de fabricación, justo a tiempo, *lead*[208] *and lean*[209] *production*, entre otros (Rey, 1996).

AFNOR define la calidad en mantenimiento como el sistema de gestión que procura buscar y eliminar la causa de las averías, las anomalías y errores. La calidad en el mantenimiento exige tres pasos: fiabilidad, habilidades y competencias y disponibilidad. Los instrumentos de calidad son perfectamente aplicables al mantenimiento, como por ejemplo: la lista de verificación, la clasificación, el esquema gráfico de gestión y el método de Pareto. El mensaje en síntesis es procurar cero averías y máxima disponibilidad para optimizar la calidad (Sourís, 1992).

Ilustración 89 - Algunas inconveniencias del Overhaul en la Curva de la Bañera



[208] *Lead Production – Producción en términos de tiempos de espera de los insumos por parte de proveedores.*
[209] *Lean Production – Producción ajustada a las cantidades requeridas por los clientes.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

5.5.1 TQC

Total Quality Control o Control de Calidad Total, es el método integrador y organizador de todas las actividades relacionadas con los niveles instrumental, operativo y táctico de mantenimiento(Wilson, y otros, 1993); de tal forma que garantiza el mejoramiento continuo (*Kaizen*) sobre la calidad de todas las personas, los procesos y los macro-procesos involucrados en un esfuerzo totalmente integrado hacia el *Kaizen* en cada una de las etapas. El *TQC* es uno de los objetivos básicos de la táctica *TPM*.

5.5.2 TQM

Total Quality Management o Manufactura de Calidad Total, también denominado Manejo de la Calidad Total, la táctica *TPM* asume algunos de las características básicas del *TQM*, entre ellas:

- Compromiso total de las altas directivas de la organización donde se aplica.
- El personal que se involucra en los cambios posee plena autorización para ello, delegada de los niveles jerárquicos superiores.
- La planeación del proceso *TQM* es a largo plazo.
- El *TQM* requiere un cambio estructural, filosofal y organizacional de la empresa y de las personas involucradas.

El *TQM* es consecuencia de la integración que logra desarrollar W. Edwards Deming's en Japón después de la segunda guerra mundial, con los conceptos de: análisis estadísticos para controlar la calidad de los productos elaborados y/o servicios entregados, estudios de proceso y la ética personal del pueblo japonés; con lo cual logra concebir e implementar un nuevo estilo de vida industrial y una nueva cultura de manejo eficaz y efectivo de las empresas, dando lugar al *Total Quality Management* (Nakajima, y otros, 1991).

En la actualidad existe una perfecta simbiosis entre mantenimiento y *TQM*, ya que muchas de las técnicas que este último involucra, conducen a mejoras en los diferentes niveles de mantenimiento, con lo cual se eleva la productividad y la calidad de procesos como de los productos fabricados y/o de los servicios elaborados.

Tanto el *TQM*, el *TQC* y las 5S son herramientas aplicables a cualquiera de las operaciones, tácticas y estrategias de mantenimiento, totalmente válidas de usar en cualquiera de los niveles dos, tres y cuatro de mantenimiento. Aunque se asocian normalmente a la táctica *TPM* no son exclusivas de esta, pues su aplicación es independiente de la táctica en que se encuentre involucrada la empresa(Wilson, y otros, 1993).

5.5.3 5S

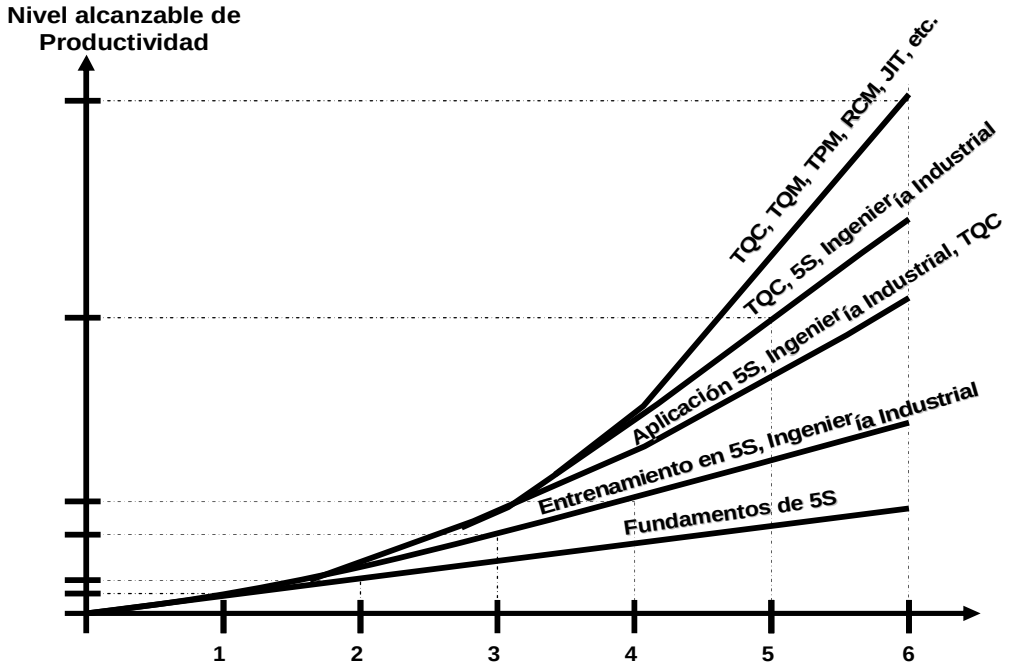
Las 5S son instrumentos avanzados que permiten elevar la productividad y mejorar el ambiente de trabajo, tanto en mantenimiento como en producción; una de sus ventajas es que se constituyen en una base fundamental de cualquier operación y táctica. Es ideal aplicar este instrumento en empresas que han superado el nivel operativo y se preparan a implementar una táctica en el nivel tres de mantenimiento, pues permite cohesionar y aglutinar el personal de producción con el recurso humano de mantenimiento, alrededor de las máquinas que se evalúan, construyendo de esta forma las bases para la aplicación de cualquier táctica y por ende la posterior implementación de la estrategia integral de mantenimiento.

El programa de las 5S consiste en actividades de orden y limpieza[210] en el lugar de trabajo, que por su sencillez permiten la participación de pequeños grupos de trabajo a lo largo y ancho de la compañía. Se basan en la creencia de que cada individuo del grupo puede contribuir con el mejoramiento de su lugar de trabajo, en donde permanece gran parte de su tiempo.

[210] *Que en algunas ocasiones son la fuente inicial de fallas y pérdidas de funcionalidad.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 90 - Diferentes procesos de mejora continua en el tiempo, todos basados en las 5S



(Mora, 2007b)

Las 5S son un conjunto de cinco palabras japonesas que inician con la letra S:

Ilustración 91 - Significado y acciones de cada una de las 5S

SEIRI	…….	SELECCIONAR	**:** Separar, descartar, despejar
SEITON	…….	ORDENAR	**:** Acomodar, ordenar
SEISO	……..	LIMPIAR	: Limpiar inspeccionando
SEIKETSU	…….	ESTANDARIZAR	**:** Mantener, uniformar, mejorar
SHITSUKE	…….	AUTODISCIPLINA	**:** Entrenamiento y disciplina

La clave de éxito en la implementación de las 5S consiste en mantener siempre presente los siguientes principios:

- Compromiso de todas las personas de mantenimiento y producción.
- Capacitación y entrenamiento permanente.
- Involucrar a todo el recurso humano de la organización, en especial a mantenimiento-producción-calidad.
- Reforzar y monitorear permanentemente el proceso, reiniciándolo periódicamente, para mantener y superar los niveles alcanzados en cada una de las 5S.
- El sitio de trabajo debe mantenerse como una sala de recibo
- 5S aumenta la seguridad en el puesto de trabajo

Las ventajas de aplicar las 5 S, se pueden condensar en los siguientes beneficios que se logran al desarrollar su implementación:

- Mejora la eficiencia en el trabajo y reduce los costos de operación
- Mejora la productividad en el puesto de trabajo
- Reduce la ocurrencia de accidentes de trabajo mediante la eliminación de pisos aceitosos y resbalosos, ambientes sucios, ropa inadecuada y operaciones inseguras.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Incrementa la confiabilidad de las máquinas y se mantienen sus funciones.
- Se descubren funciones defectuosas en cada parte de la máquina (sobrecalentamiento, vibraciones, ruidos, anormales pequeñas grietas o roturas ...)
- Reduce los defectos y estabiliza la calidad de los productos.
- Fortalece la confianza de los clientes en la organización y mejora las ventas.
- Contribuye a que las entregas se hagan a tiempo.
- Fortalece la cultura del Mejoramiento Continuo.

En general se catalogan dentro de las mejores prácticas de mantenimiento (Benítez, 2007).

Las 5S se constituyen en una herramienta avanzada de mantenimiento fundamental para la posterior aplicación de las operaciones (correctivas, modificativas, preventivas y/o predictivas) y ulterior aplicación de cualquier táctica a través de una estrategia integral de mantenimiento.

Ilustración 92 - Objetivos y propósitos de las 5S.

5S	*Significado*	*Finalidad*
SEIRI Seleccionar	Se basa en seleccionar los objetos innecesarios en el lugar de trabajo y descartarlos; lo que no sirve se debe eliminar o donarlo. De una forma similar debe actuar en las actitudes mentales, dejando de lado todas las actitudes negativas que no permiten crecer, como son: prejuicios, malas intenciones, comentarios innecesarios, falta de respeto, dudas, temores.	• Hacer el trabajo más fácil al eliminar obstáculos. • Prescindir de cuidar cosas innecesarias y evitar las pérdidas de los objetos. • Prevenir operaciones erróneas o fallas causadas por cosas innecesarias.
SEITON Ordenar	Consiste en organizar los objetos necesarios de tal forma que sean fácilmente asequibles para su uso: • Un lugar para cada cosa. • Cada cosa en su lugar Permite la organización de los objetos y utensilios de una forma sistémica permite reducir los tiempos administrativos y logísticos de mantenimiento y producción, haciendo más visible su ubicación. También se aplica a la forma de actuar y de comportamiento social humano en el trabajo, sirve para reglamentar y estandarizar las normas de vida y conducta.	• Prevenir las pérdidas de tiempo en la ubicación y traslado de objetos, las cuales son actividades que no generan valor agregado y producen retrasos en los tiempos de mantenimiento y producción, evitando demoras en ambos procesos • Asegurar que lo que entra primero sale primero, base de la prevención de pérdidas por deterioro, debido a la vida útil de algunas materias primas para la producción. Aquí es recomendable aplicar un término de la contabilidad, los inventarios *FIFO* (*First in first out*, lo primero en entrar debe ser lo primero en salir). • Establecer procedimientos e instrucciones que faciliten la ejecución de las operaciones, actividades y procesos de mantenimiento y operación. • Implantar sistemas de control visual que permitan tanto a nivel del personal de la empresa como a nivel externo, ubicar fácilmente los lugares y los objetos, que permitan un fácil entendimiento de los procesos y los procedimientos de producción y mantenimiento.
SEISO Limpiar	Procura limpiar completamente el lugar de trabajo para que no haya elementos exógenos al proceso, disminuyendo los problemas de averías de las máquinas, contaminación, inicio de fallas, etc.	• Facilitar la elaboración de productos de calidad. • Combinar la limpieza con la inspección, con el fin de detectar fallas potenciales antes de que se inicien. • Hacer del lugar de trabajo un sitio seguro y confortable.
SEIKETSU Estandarizar	Mantiene en orden y limpio el sitio de trabajo y los utensilios de mantenimiento y producción. Se preocupa por el mantenimiento del ambiente de trabajo, logrando así mejorar el aspecto laboral, reducir la contaminación, disminuir los accidentes y los costos de mantenimiento, calidad y producción. Trata de mantener los niveles alcanzados en términos de estandarización de actividades y procesos.	• Mantener los niveles logrados de SEIRI, SEITON y SEISO. • Eliminar las causas que provocan la suciedad y un ambiente de trabajo no confortable. • Proteger al trabajador de condiciones peligrosas. • Estandarizar y visualizar los procedimientos de operación y mantenimiento diario. • Permitir que las personas de mantenimiento y producción desarrollen y muestren su talento y creatividad.
SHITSUKE Autodisciplina	Entrena a las personas para que mantengan disciplina, autonomía, buenas prácticas de orden y limpieza. El recurso humano reconoce la bondad de la aplicación de las 5S para el beneficio colectivo e individual. Es un proceso que requiere tiempo, pero sobre todo mucho esfuerzo y constancia de quienes son responsables del proceso de implantación.	• Hacer a las personas más disciplinadas y con buenos modales, en otras palabras se necesita fomentar nuevas costumbres y valores dentro de la empresa, hace énfasis en descartar los paradigmas antiguos y adquirir otros más productivos. • Cumplir con las reglas de la empresa y de la sociedad. • Tener un personal más proactivo.

(Mora, 2007a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Programa de CD 5 - Power Point – Presentación de Sistemas Visuales – 5S

5.5.4 Mejoramiento continuo

Consiste en tratar de optimizar el uso de los factores básicos de producción y mantenimiento a través del análisis permanente de actividades, procesos y macro-procesos; con el fin de eliminar tiempos de demora, controlar y erradicar fallas, reducir costos, elevar niveles de servicio, mejorar la productividad, incrementar la rentabilidad y aumentar la competitividad de la empresa, sobre todo en las áreas de mantenimiento, calidad y producción. Dentro de la filosofía de mejoramiento continua son muy importantes aspectos como el enfoque de mantenimiento hacia el servicio centrado en el cliente, las 5 S, el *TPM*, y la calidad total, la cultura del cambio permanente buscando mejores prácticas, asesoría al cliente interno, etc. (Benítez, 2007).

Existen diversos métodos que procuran el mejoramiento continuo en cierta forma aplicables a la gestión de mantenimiento; entre ellos sobresalen, el Kobetsu-Kaizen que se fundamenta en la superación individual y grupal permanente y el *PM* (con P de *Physique* física, M de *Machine* máquina y *Matières* materiales en francés) que consiste en estudios frecuentes de procesos de materias primas, máquinas, energía y señales. Los cinco pasos del *PM* con los cuales mantenimiento aborda la solución de averías en la máquina antes de que repercuta sobre los productos, con el fin de obtener la mejor calidad en ellos, son:

- Cumplir las condiciones básicas (limpieza, engrasados, ajuste, etc.).
- Respetar las condiciones de utilización.
- Reparar todas las degradaciones observadas.
- Mejorar las deficiencias de diseño.
- Mejorar las condiciones de operación, producción y mantenimiento.

Asociado a los conceptos de mejoramiento continuo, a las 5 S, a la calidad total, se encuentra el Kaizen.

Es una filosofía, un modo de vida que busca hacer mejor cada día lo hecho el día anterior. No se trata de dar enormes saltos para obtener grandes cambios, por el contrario, se trata de un mejoramiento lento y seguro, con el establecimiento de estándares que se deben ir superando continuamente.

La esencia del Kaizen es sencilla y directa: Kaizen significa mejoramiento.

Más aún, significa mejoramiento progresivo, continuo, que involucra a todos en la organización.

Kaizen es un enfoque humanista, porque espera que todos participen en él.

El mensaje de la filosofía Kaizen es que no debe pasar un día sin que se haya hecho alguna clase de mejoramiento en algún lugar de la compañía. A los ingenieros de las plantas japonesas con frecuencia se les previene, con mensajes como: ….no habrá ningún progreso si ustedes continúan haciendo las cosas de la misma manera todo el tiempo….. (Benítez, 2007)

Con relación al *TPM* y más concretamente con uno de sus pilares básicos como es el mantenimiento autónomo, el cual busca involucrar a los operarios de los equipos en actividades primarias o básicas del mantenimiento, es importante resaltar sus objetivos: el Mantenimiento Autónomo, está compuesto por un conjunto de actividades que se realizan diariamente por todos los trabajadores, incluyendo inspección, lubricación, limpieza, cambio de herramientas y piezas, estudiando posibles mejoras, analizando y solucionando problemas del equipo y acciones que conduzcan a mantener el equipo en las mejores condiciones de funcionamiento. Estas actividades se deben realizar siguiendo estándares previamente preparados con la colaboración de los operarios. Los operarios deben ser entrenados y deben contar con los conocimientos necesarios para dominar el equipo que operan.

Algunos de los propósitos del Mantenimiento Autónomo, son (Benítez, 2007):

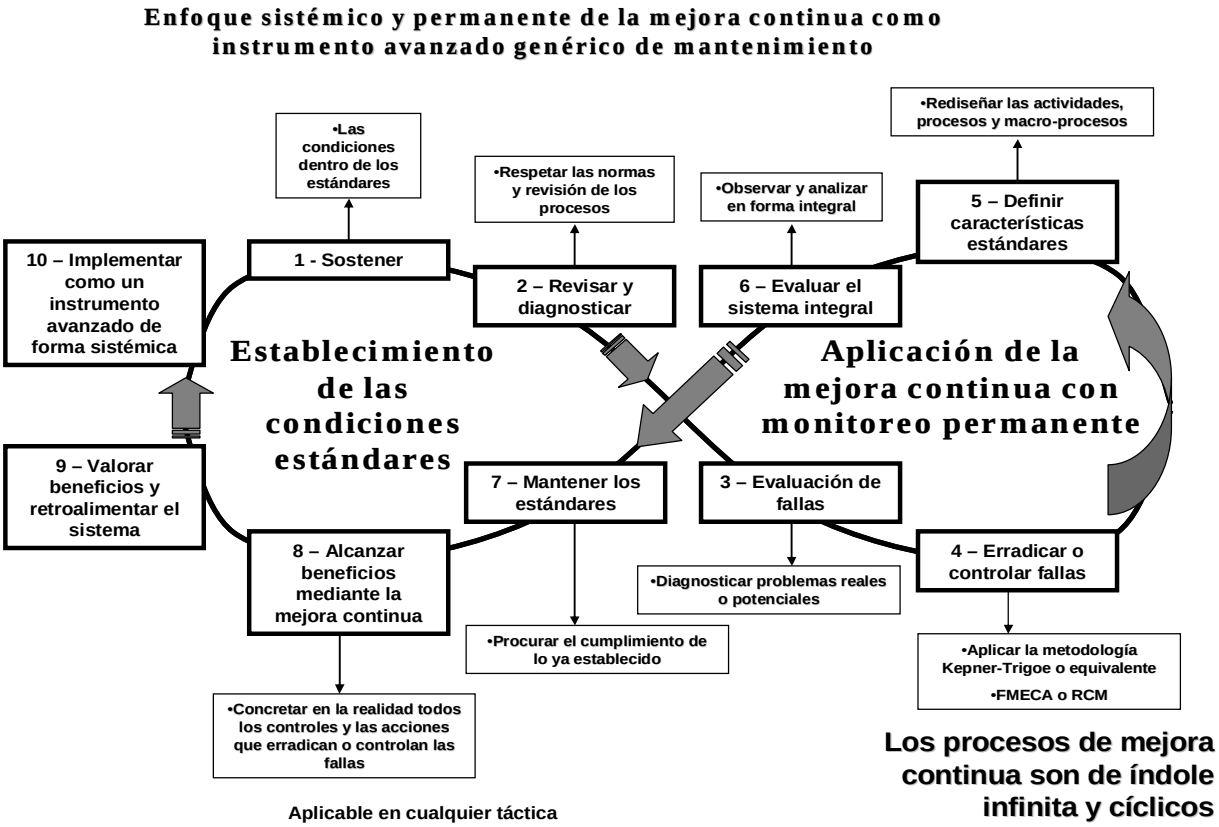
- Emplear el equipo como instrumento para el aprendizaje y adquisición de conocimiento.
- Desarrollar nuevas habilidades para el análisis de problemas y creación de un nuevo pensamiento sobre el trabajo.
- Mediante una operación correcta y verificación permanente de acuerdo a los estándares se evite el

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

deterioro del equipo.
- Mejorar el funcionamiento del equipo con el aporte creativo del operador.
- Construir y mantener las condiciones necesarias para que el equipo funcione sin averías y rendimiento pleno.
- Mejorar la seguridad en el trabajo.
- Lograr un total sentido de pertenencia y responsabilidad del trabajador.
- Mejora de la moral en el trabajo.

Es importante recordar que el mantenimiento autónomo funciona, donde se no se trabaja con tecnologías demasiado avanzadas o de punta, tiene cabida en empresas de tecnologías medias o incipientes (Mora, 2007a).

Ilustración 93 - Desarrollo del mejoramiento continuo en mantenimiento



(Mora, 2007b)

La utilización de las prácticas de mejoramiento debe tener siempre parámetros de medición, mediante el uso de índices, rendimientos o indicadores de actividades, procesos o macro-procesos tales como CMD, *LCC*, etc. con el fin de poder evaluar si verdaderamente existe mejora en los procesos o en las actividades que se rediseñan o intervienen, el solo hecho de verbalizar los conceptos del mejoramiento continuo no se constituye en el método, para que sea de hecho mejora debe estar acompañado de mediciones constantes.

5.5.5 Herramientas estadísticas

El análisis exhaustivo y completo de los datos obtenidos de procesos de mantenimiento y producción mediante las herramientas estadísticas, genera instrumentos avanzados de mantenimiento que ayudan a encontrar: fallas para su eliminación o control, causas de productos y servicios defectuosos para su erradicación, fundamentos cuantitativos para la selección o mejora de acciones-táctica-estrategia de mantenimiento y/o producción, elementos básicos para una mejor toma de decisiones sobre el manejo y operación de los instrumentos básicos de mantenimiento-producción-calidad, índices para el mejor control de los procesos, etc.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La desviación de los estándares establecidos como óptimos es la causa de los servicios (reparaciones o tareas proactivas) inadecuados de mantenimiento y/o producción; esta variación se puede encontrar en cuatro fuentes:

- Materiales de la misma calidad y con idénticas especificaciones técnicas.
- Máquinas, herramientas, utensilios y repuestos adecuados.
- Métodos y procedimientos estándares, normalizados y reglamentados de trabajo.
- Verificaciones de calidad de las acciones y procesos de trabajos realizados, similares en todas las inspecciones.

Cuando algunas de estas características varían de los estándares establecidos, se producen errores en las acciones, tácticas o estrategias de mantenimiento, la estadística provee las herramientas básicas para su análisis y control.

Las causas pueden ser innumerables, pero solo algunas de ellas generan una gran cantidad de fallas y productos como servicios defectuosos con características fuera del estándar.

La estrategia para encontrar las causas de fallas y de servicios defectuosos requiere de varios elementos básicos: el primero es la actitud de las personas hacia el cambio para encontrar las fuentes de errores, el segundo es el grado de entrenamiento para el desarrollo de habilidades y competencias del personal analítico de producción y mantenimiento para realizar los estudios y dedicar gran parte del tiempo a la captura de las causas de las desviaciones, un tercer elemento lo constituyen las herramientas estadísticas, pero es importante aclarar que estas últimas por sí solas no solucionan los problemas de variación; requiere de los tres elementos simultáneos y de muchos otros menos relevantes.

5.5.5.1 Diagnóstico, control y rediseño de procesos de mantenimiento y producción

El control y rediseño de proceso se puede considerar un instrumento avanzado de mantenimiento, dado que permite revisar todas las actividades y elementos estructurales de un proceso. Su análisis detallado permite encontrar situaciones fuera del estándar, por medio de estos métodos se puede establecer un proceso coherente, lógico y organizado de todos los recursos y acciones (planeadas o no) de mantenimiento y producción. Sobresalen en el medio dos metodologías: *Vital Signs - Performance* (Signos Vitales del *Quantum Performance*) (Hronec, 1995) donde se establece un control total, detallado e interrelacionado del sistema de mantenimiento[211] o producción en tiempo real, con participación de todos los empleados y trabajadores de la empresa (Mora, 2007a)o últimamente se trabaja también con *Balanced ScoreCard*[212] (Cuadros y Tableros de Control) (Kaplan, y otros, 1997) que ha sido aplicado a la táctica de mantenimiento *RCM* (RCMScorecard@, 2005), por varios autores en los últimos tiempos.

La metodología Signos Vitales permite analizar todas las actividades, los procesos y los macro-procesos que se dan en sistema empresarial, es muy útil a la hora de evaluar los cuatro niveles de mantenimiento: instrumental, operativo, táctico estratégico; se basa en conceptos de medición y estudio logístico del tiempo, costo y calidad de las acciones operativas de cualquier proceso, usa una metodología sistémica para su desarrollo, involucra a todo el personal directo e indirecto de una organización desde los proveedores de los suplidores, hasta los consumidores de los clientes directos e involucra entidades financieras y logísticas que apoyan en el proceso a la empresa que se estudia, genera bienestar en las personas y mejora notoriamente el clima organizacional, eleva el nivel de compromisos e involucra en su máximo grado a todo el recurso humano, es una forma sencilla de empoderamiento a empleados y trabajadores, permite el fácil reconocimiento y entendimiento de todas las actividades y procesos por parte de los miembros de la organización, propende la organización por procesos más que por funciones, procura satisfacer a los clientes externos e internos de la compañía, permite medir el grado de aplicación real de: visión-misión-valores-estrategia-comunicación-etc. en todas las personas internas y externas de la empresa equilibrando sus intereses personales y los empresariales, logra el equilibrio entre los intereses personales y empresariales, divulga y sustenta los métodos de medición y evaluación de todos los miembros de la organización, etc.; en fin, son innumerables los beneficios de corto, mediano y largo plazo que este método conlleva al revisar en una forma integral y específica el área de mantenimiento (Mora, y otros, 2003) (Hronec,

---

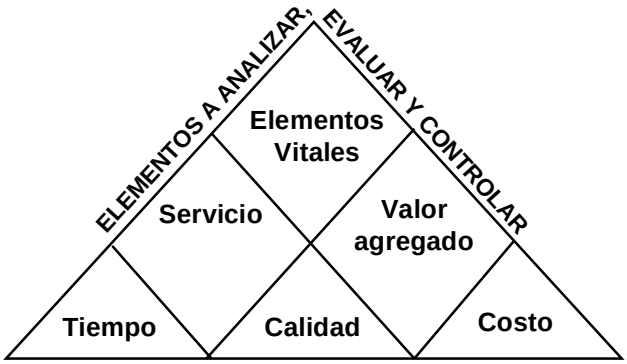
[211] *Realmente la metodología de Hronec es aplicable a cualquier sistema bajo el esquema kantiano, no solo es propio de mantenimiento.*

[212] *El método de Signos Vitales inicia desde la base operativa y asciende a los niveles más altos de la organización trabajando bajo el método de planeación estratégica, mientras que el de Tableros de Control trabaja los niveles superiores de la organización bajo un enfoque de dirección estratégica. En los procesos de direccionamiento estratégico solo participan Funcionarios de la Alta Dirección de la empresa (Steiner, 1985) y en los de planeación estratégica toda la organización con sus nexos externos.*

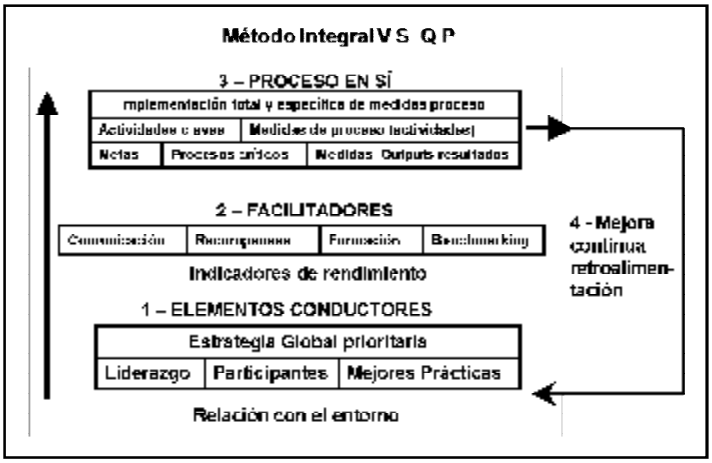
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

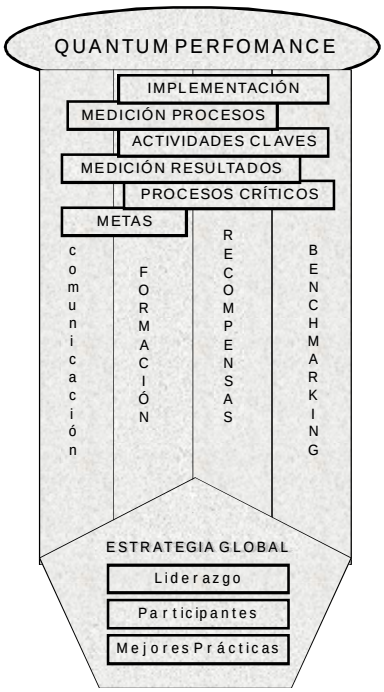
1995).
Los métodos de *Balanced Scorecard* como *Vital Signs*, persiguen fines equivalentes y usan metodologías similares, ambos son recomendables para los propósitos enunciados anteriormente.

Ilustración 94 - Elementos, sistema y conceptos básicos del Vital Signs Performance de Hronec



Aplicado a Personas – Actividades – Procesos – Macro-procesos





PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

	CATEGORÍAS		
	Costos.	Calidad.	Tiempo.
Nivel 1: Organización	Financiero Operativo Estratégico	Empatía. Productividad. Confianza. Credibilidad. Competencia.	Velocidad Flexibilidad. Elasticidad. Involucrarse.
Nivel 2: Proceso.	Entradas. Inputs. Actividades.	Adaptabilidad Productividad	Velocidad. Flexibilidad.
Nivel 3: Personas.	Compensación Desarrollo Formación Motivación.	Confiabilidad. Credibilidad. Aptitud Competencia	Involucrarse. Compromiso. Flexibilidad.
	Costos.	Calidad.	Tiempo.
	CATEGORÍAS		

La estadística alcanza el nivel de instrumento avanzado de mantenimiento y producción, ya que es la base en el manejo de los factores productivos de ambas áreas, también sirve para el manejo y control de las operaciones en el nivel dos de mantenimiento, de igual forma es la herramienta por medio de la cual se analizan los distintos elementos CMD y asociados para decidir la mejor táctica y sirve como metodología para poder dimensionar el éxito alcanzado en el nivel cuatro (estratégico) de mantenimiento con el fin de calcular y establecer los diferentes índices, rendimientos e indicadores.

Entre los elementos básicos y los métodos fundamentales de la estadística, sobresalen:

5.5.5.2 Obtención y manejo de los datos

Desde el nivel básico de mantenimiento, el instrumental, es necesario la recolección exhaustiva de datos como: tiempos de fallas y reparaciones, unidades de horas útiles sin fallas, medidas de tiempo de retrasos y demoras en la realización de los mantenimientos y adquisición de suministros, registros de unidades en inventarios como consumos y entradas, historia de repuestos y reparaciones realizadas, costos de las órdenes de trabajo realizadas, modificaciones a equipos y demás información pertinente que proporcione las bases para poder avanzar a los niveles superiores de mantenimiento. En la recolección de información se pueden establecer tres objetivos importantes:

- Control y monitoreo del proceso integral y específico de mantenimiento.
- Análisis de todo lo que esté fuera del estándar.
- Inspecciones de los servicios de mantenimiento realizados.

Lo primero que debe tener todo proceso de manejo de datos e información es un objetivo claro y alcanzable. Para cada propósito de cualquiera de los cuatro niveles de mantenimiento se establecen objetivos y por ende la información requerida que permita su análisis, su comparación, su estratificación y su grado de dispersión frente al propósito deseado, con el fin de poder argumentar bien las decisiones que se tomen.

El segundo aspecto que se tiene en cuenta es la validez y la oportunidad del registro de información. Es necesario validar mediante dos o más metodologías la información adquirida y debe ser registrada por personas debidamente entrenadas en ello; al igual la información se obtiene en tiempo real con el fin de poder decidir oportunamente cualquier acción requerida de mantenimiento. Los formatos y hojas físicas (o digitales) de registro deben ser cuidadosamente elaboradas con el fin de establecer la cantidad básica, de tal forma que no se vaya a caer en el exceso de información; al igual el sistema de información debe proveer la debida arquitectura para el registro, manipulación y análisis de los datos en tiempo real (Kume, 1992).

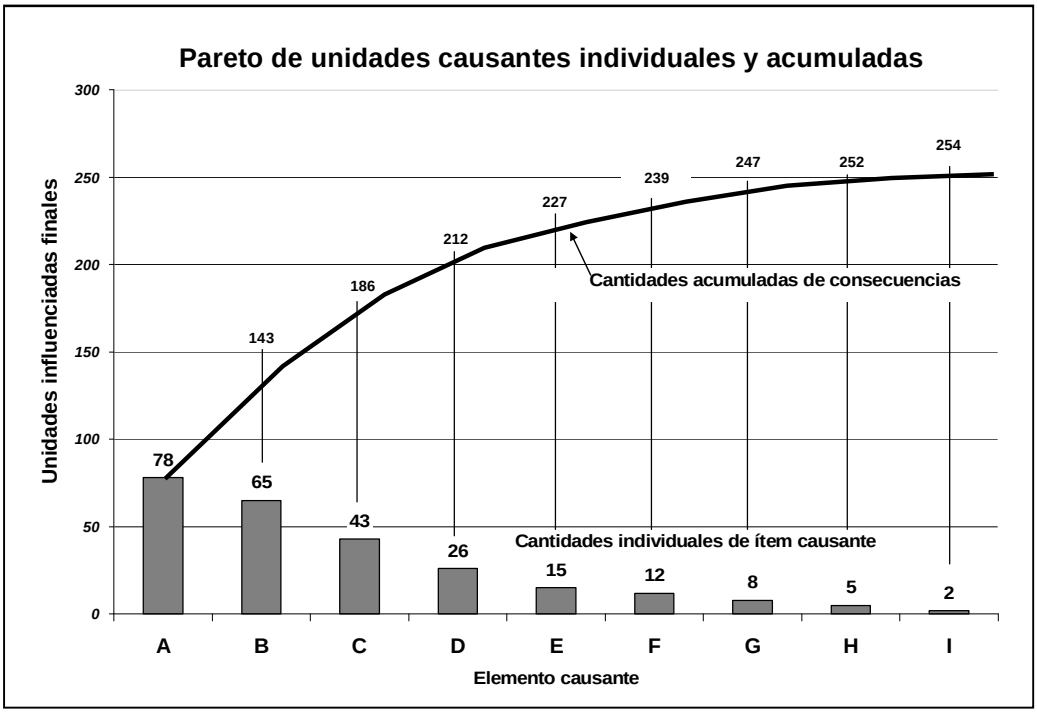
5.5.5.3 Análisis y diagramas de Pareto

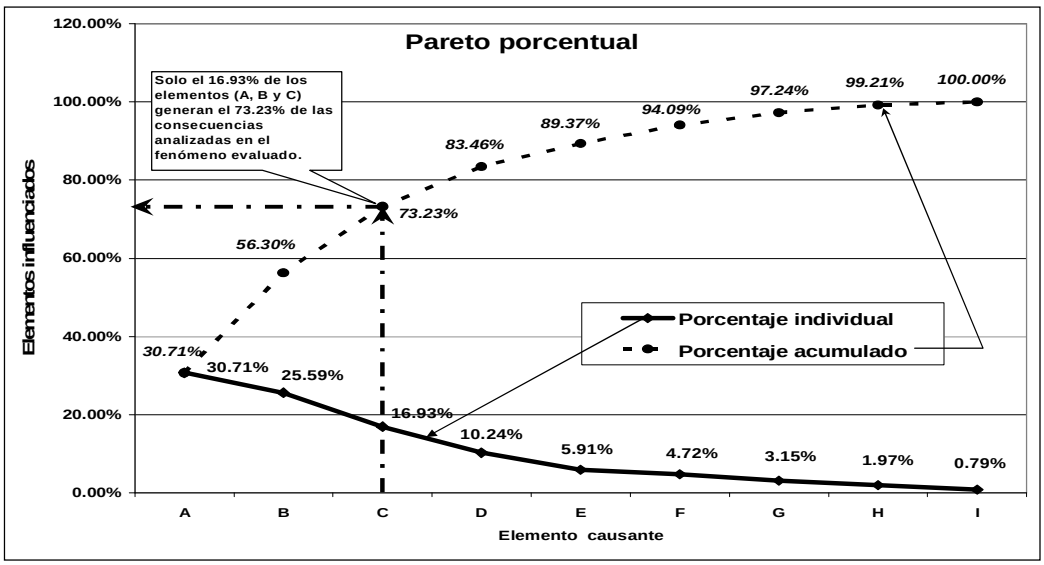
Es una metodología que permite ver el grado de influencia de unos pocos elementos en el total de los resultados obtenidos, es notoria su bondad en cuanto a que puede registrar la influencia de unos cuantos elementos en un gran porcentaje del fenómeno final. Permite descartar la influencia de muchos elementos triviales en la consecuencia de una actividad o falla.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 95 - Gráfico y Diagrama de Pareto

PARETO		Fenómeno final evaluado			
Ítem	Elementos causantes	Consecuencias individuales	Consecuencias acumuladas	Porcentaje individual	Porcentaje acumulado
A	Elemento 1	78	78	30.71%	30.71%
B	Elemento 2	65	143	25.59%	56.30%
C	Elemento 3	43	186	16.93%	73.23%
D	.....	26	212	10.24%	83.46%
E	Elemento n	15	227	5.91%	89.37%
F	Elemento n+1	12	239	4.72%	94.09%
G	Elemento n+2	8	247	3.15%	97.24%
H	Elemento n + ...	5	252	1.97%	99.21%
I	Elemento final	2	254	0.79%	100.00%
	Gran total	254		100.00%	



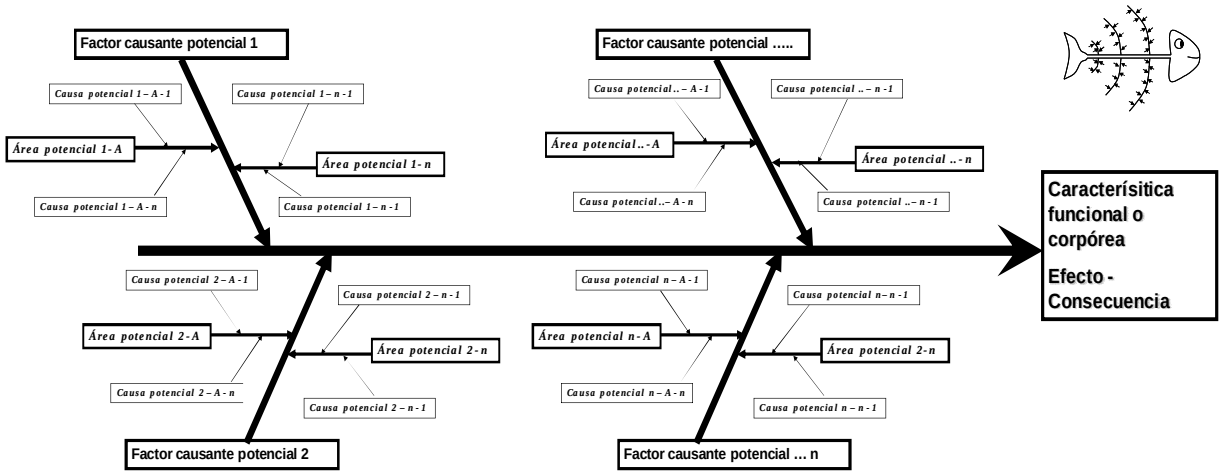


PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

5.5.6 Diagramas causa-efecto

Los instrumentos avanzados de mantenimiento pueden contar con una herramienta vital en los procesos de causas de fallas o productos y/o servicios defectuosos, la cual es el diagrama causa-efecto, lo desarrolla en Japón Kaoru Ishikawa en 1953 (Ishikawa, 1985); el método también aplica a cualquier análisis de los cuatro niveles de mantenimiento.

Ilustración 96 - Diagrama causa-efecto de Ishikawa



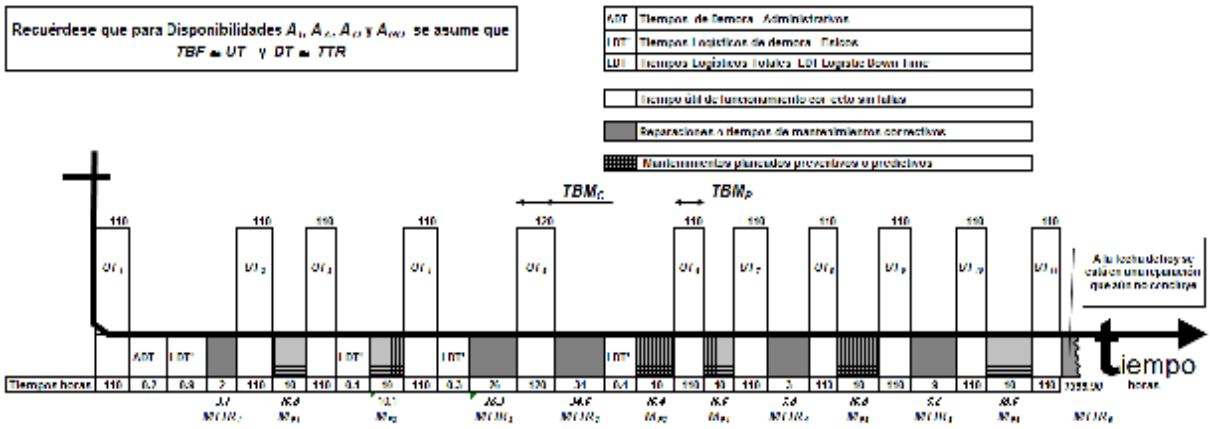
El diagrama de Ishikawa también recibe el nombre de espina de pescado o diagrama de árbol o de río. En primera instancia ubica y esquematiza todas las causas potenciales que generan la falla o el defecto en el servicio de mantenimiento o de producción, posteriormente establece planes para su eliminación o control. Su utilización es práctica, sencilla, grupal y muy aplicada a nivel mundial (Ishikawa, 1985).

5.5.6.1 Histogramas.

Sirve para identificar la distribución de actividades relevantes de mantenimiento o de producción y permite visualizar de un modo especial los sucesos a través del tiempo.

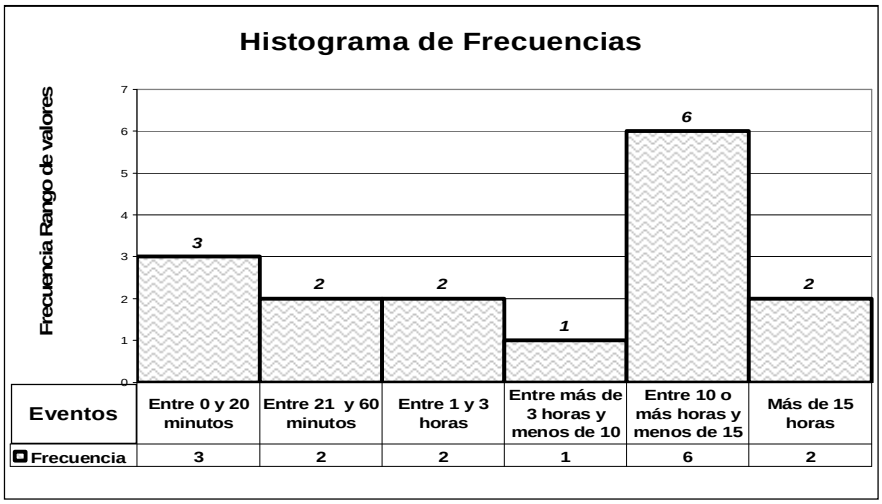
Ilustración 97 - Histograma de tiempos de no funcionalidad

Se toman los datos del Ejercicio 28 - Ejemplo de Disponibilidad Operacional A_O, cálculos con distribuciones.



Los tiempos en horas, en que el equipo se ve afectado en no funcionalidad son: 0.2, 0.9, 2, 10, 0.1, 10, 0.3, 26, 34, 0.4, 10, 10, 3, 10, 9 y 10 (para simplificar el ejemplo se asumen como eventos independientes). En total son 16 eventos.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



Las medidas de posición: moda es el evento que más repite es 10.0 horas y la mediana que es el número del medio donde la mitad de los números del conjunto está por encima de ella y la otra mitad por debajo es 9.50 horas.

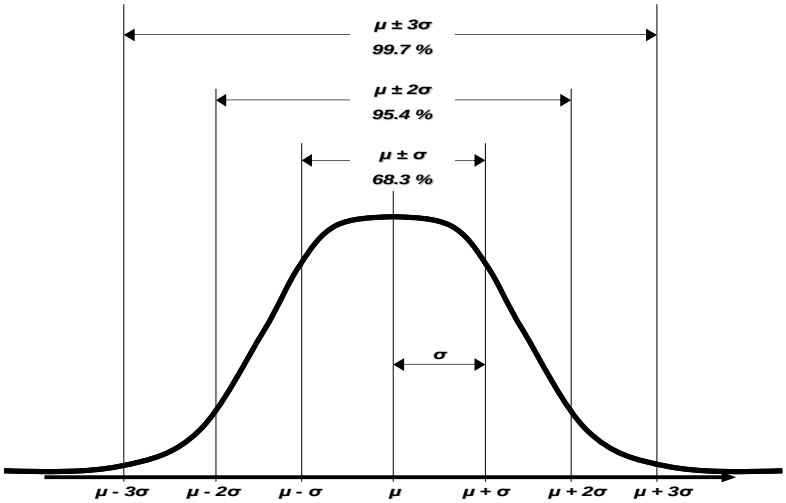
La media aritmética de los eventos de no funcionalidad tomados independientemente es 8.49 horas.

5.5.6.2 Distribuciones

La representación numérica y gráfica de eventos de mantenimiento y/o producción mediante el uso de distribuciones es un instrumento avanzado de mantenimiento útil para el análisis, estudio, comprensión y toma de decisiones en cualquiera de los cuatro niveles de mantenimiento, su aplicación permite observar el comportamiento en el tiempo de cualquier fenómeno.

En capítulos anteriores se presentan diferentes distribuciones y sus análisis, desde la óptica del CMD., entre ellas se distinguen para el método de distribuciones: normal, LogNormal, Weibull y Gamma para la valoración de indicadores y parámetros CMD, se pueden utilizar los conceptos desarrollados precedentemente para cualquier otra utilización. Para trabajar con los parámetros de cada una de las distribuciones véase las secciones anteriores correspondientes.

Ilustración 98 - Distribución normal con sus parámetros μ, σ y su probabilidad[213].



[213] *Conocida también como campana de Gauss-Laplace.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La probabilidad de una distribución normal para control de procesos estadísticos, se realiza a partir del uso de la tabla de distribución normal y de la estandarización de la distribución, así:

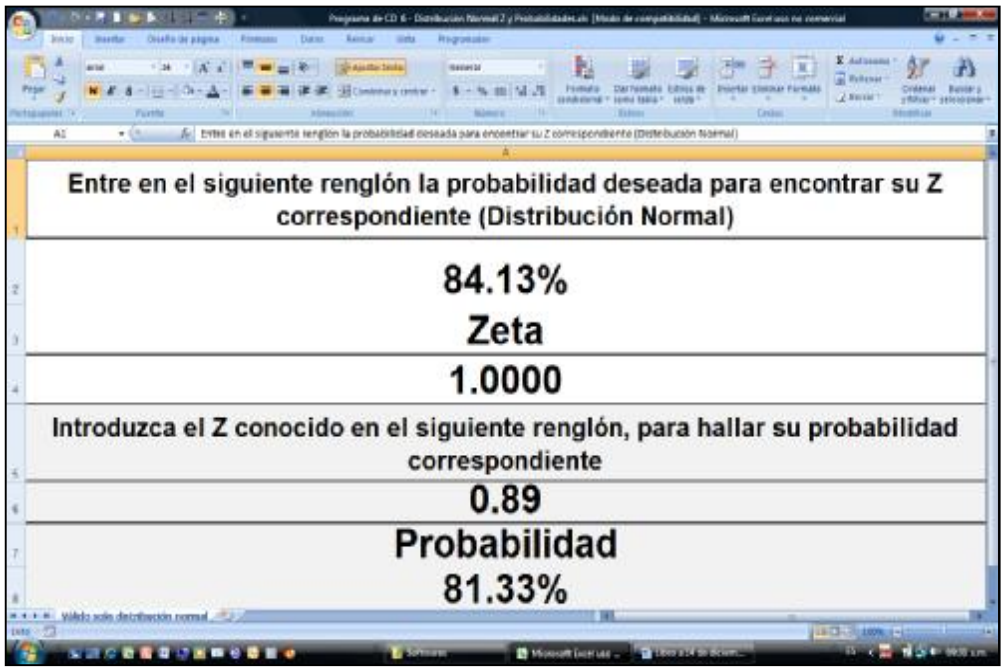
Ecuación 62 - Estandarización en distribución normal, mediante la transformación de una variable aleatoria x en:

$$u = \frac{x-m}{s}, \text{ donde la medida estándar } u, \text{ se distribuye como una distribución normal.}$$

La probabilidad de que una variable aleatoria x caiga dentro de los límites $\mu \pm u * \sigma$, se describe en tres opciones en la Ilustración anterior. Técnicamente una variable normal puede tomar valores entre -∞ y +∞, en la gráfica descrita se observa que para una probabilidad del 99.7 %, u vale 3, esto en la práctica describe que la posibilidad de que x caiga fuera de los límites de $\mu \pm 3\sigma$ es despreciable, este hecho se denomina la regla de 3 sigma y es fundamental en los análisis estadísticos de hojas de control de procesos.

La lectura de las probabilidades se puede obtener directamente del Excel de Microsoft Office. Tiene dos posibilidades: dado un valor de z encuentra la probabilidad asignada por la distribución normal, mediante la utilización del argumento de función DIST.NORM.ESTAND.INV (z) y obtiene de esta manera la probabilidad con un z conocido; o el caso inverso donde se tiene la probabilidad y se desea conocer la z correspondiente, donde entonces se usa el argumento de función de Excel DISTR.NORM.ESTAND (Probabilidad). Para esto puede usar el Programa de CD 6 - Distribución Normal Z y Probabilidades, que lo encuentra en la sección Softwares.

Programa de CD 6 - Distribución Normal Z y Probabilidades



5.5.6.3 Diagramas de dispersión, correlación y regresión lineal

La relación entre dos variables, la influencia de una en la otra o viceversa, la concentración entre pares de datos de dos variables, la ecuación que las relaciona, etc.; se puede lograr con la construcción de los diagramas de dispersión, mediante la medición del grado de correlación de las dos variables y con la determinación de una ecuación por el método de regresión lineal que cuantifique la relación y dependencia entre ambas variables. Las dos variables pueden ser una característica de mantenimiento y un factor de causa, dos características o dos factores asociados a una característica.

A manera de ejemplo se desea conocer la relación entre los pares de datos de tiempos de no funcionalidad (en horas) y el número de trabajadores asignados a esa reparación o mantenimiento planeado.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ejemplo 31 - Diagramas de dispersión, correlación y regresión lineal

	Variable X	Variable Y
Ítem	**Tiempo de no funcionalidad**	**Número de trabajadores**
1	3.1	5.2
2	14	7
3	15	7
4	26.3	9
5	22	7.5
6	21	8.4
7	3	4.8
8	14	6.9
9	7	5.5
10	11	6.5

$$Ajuste = \sum \left| Y_j - \hat{Y}_j \right| = 0.000$$ Ajuste

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N-2}} = 0.3120$$ Error Estándar del Estimado o Variación o Error Típico

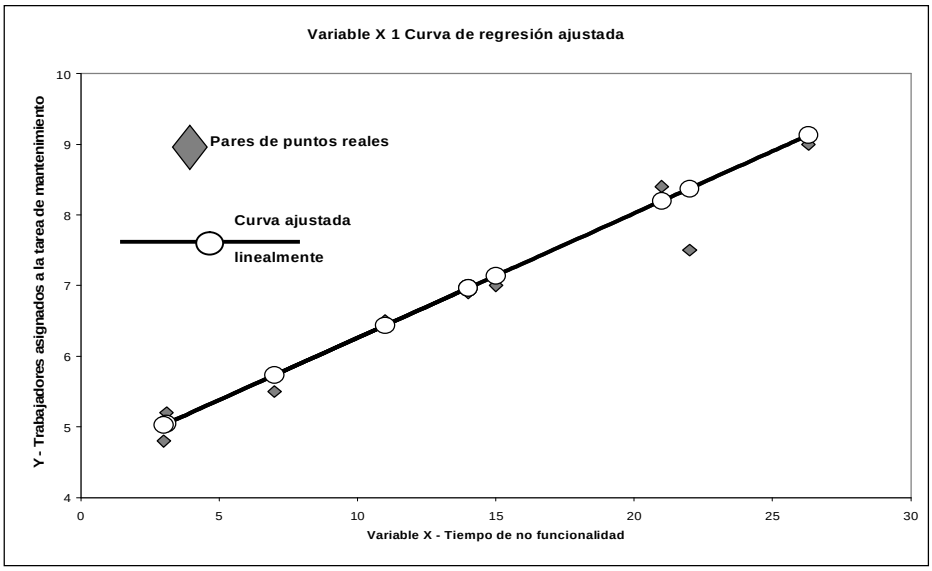
$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y_j})^2} = 0.9523$$ Coeficiente de Determinación Muestral

Coeficiente de determinación muestral r^2 ajustado **0.9463**

r^2 ajustado debe ser mayor a 0.90

Coeficiente de Correlación Múltiple

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X}) * (Y_j - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_j - \overline{X})^2 * \sum_{j=1}^{N} (Y_j - \overline{Y})^2}} = 0.9758$$



En general la dispersión tiene un buen ajuste con el método de regresión lineal, las cinco pruebas cumplen relativamente bien, en especial la de correlación en cuanto al signo + positivo denota que mientras una variable crece, la otra también, si fuese negativo sería a la inversa. Para mayores detalles de correlación, regresión lineal y pruebas de verificación, véase sección 3.4 Uso del método de regresión lineal con mínimos cuadrados para alinear la función de probabilidad de Fallas (de no confiabilidad) o de mantenibilidad, para obtener parámetro.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

5.5.6.4 Gráficas de control

Un instrumento avanzado de mantenimiento aplicable en los cuatro niveles, es la gráfica de control, por medio de la cual se establecen límites (superior e inferior) con el fin de valorar si el proceso está dentro de lo aceptable. La gráfica puede ser de valores continuos o discretos, en cualquiera de ellos los límites se definen con la regla de 3 sigma:

Ecuación 63 - Límites para gráficos de control de procesos de mantenimiento

$$Límites = valor\ \ promedio(m) \pm 3 * desviación\ \ estándar\ (s)$$

Ilustración 99 - Gráfica de control de proceso

Valor de la variable	Límite superior	Límite inferior	Control
546	812.2819851	438.7875789	OK
519	812.2819851	438.7875789	OK
487	812.2819851	438.7875789	OK
1232	812.2819851	438.7875789	Fuera de control
786	812.2819851	438.7875789	OK
342	812.2819851	438.7875789	Fuera de control
490	812.2819851	438.7875789	OK
489	812.2819851	438.7875789	OK
123	812.2819851	438.7875789	Fuera de control
501	812.2819851	438.7875789	OK
543	812.2819851	438.7875789	OK
765	812.2819851	438.7875789	OK
517	812.2819851	438.7875789	OK
546	812.2819851	438.7875789	OK

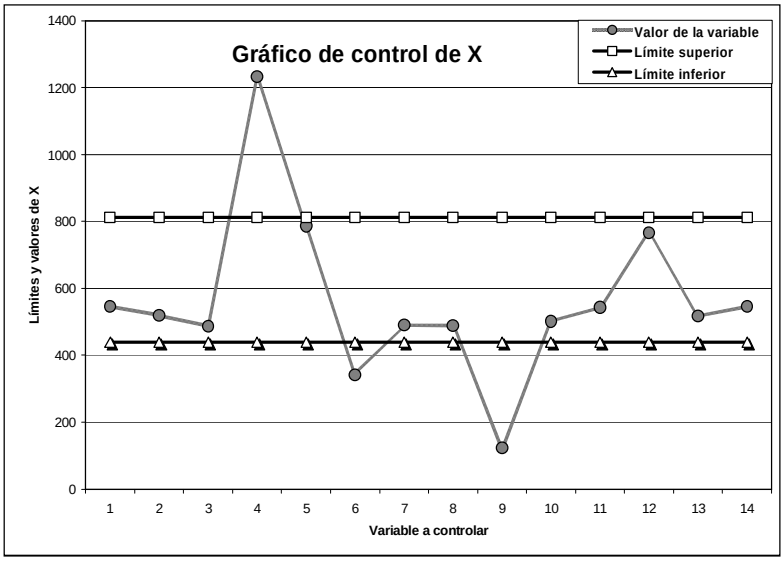


Ilustración 100 - Tipos de gráficos de control de procesos de mantenimiento

Valor Característico	*Nombre*
Valor continuo	*Gráfica* $\bar{x} - R$ *(Valor promedio y rango)* *Gráfica x (Variable de medida)*
Valor discreto	*Gráfica pn (Número de fallas o servicios defectuosos)* *Gráfica p (Fracción porcentual de fallas o servicios defectosos)* *Gráfica c (Número de defectos)* *Gráfica u (Número de defectos por falla o por servicio de mantenimiento)*

5.5.6.5 Tamaños muestrales de la población para medias – Números aleatorios

En ocasiones cuando se desea tomar una muestra de un universo o población de máquinas (o elementos) lo

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

suficientemente grande, se requieren aplicar algunas metodologías estadísticas; sin pretender profundizar en el tema se muestra a continuación un ejemplo que permite aplicar las fórmulas pertinentes para estimar el tamaño muestral y obtener un adecuado valor de la media del fenómeno a estudiar, con validez estadística. Esto sucede a menudo para inspecciones de mantenimientos planeados o predictivos, para estudiar el comportamiento de algún elemento o determinar una causa de falla, o decidir sobre un tiempo medio de falla o reparación; como en múltiples aplicaciones en los cuatro niveles de mantenimiento.

Ecuación 64 - Fórmulas para determinar el tamaño muestral en medias de proporciones o valores.

Para valores, n se expresa así:

Para población infinita $$n = \frac{Z^2 * s^2}{\left(\overline{X} - m\right)^2}$$

y

para población finita

$$n = \frac{s^2}{\frac{\left(\overline{X} - m\right)^2}{Z^2} + \frac{s^2}{N}}$$

donde n es el tamaño muestral a determinar, N es el tamaño poblacional (o universal), s es la desviación estándar de la muestra de 31 o más elementos (requerida para poder aplicar las fórmulas, se realiza en forma previa a la estimación final de n (o sea se requiere para estimar n, se recomienda sea tomada al azar con los números aleatorios)), con $\left(\overline{X} - m\right)$ como el error de precisión (se recomienda no sea superior al 5 %) deseado donde $\overline{X}$ es la media de la muestra de 31 elementos o más elementos y m es la media poblacional (del universo) esperada; Z es el nivel de confianza a obtener con la distribución normal con una probabilidad de 100% menos $\left(\overline{X} - m\right)$.

Para proporciones, n se determina con las fórmulas:

Para población infinita $$n = \frac{Z^2 * (p * q)}{(p - p)^2}$$

y

para población finita

$$n = \frac{p * q}{\frac{(p - p)^2}{Z^2} + \frac{p * q}{N}}$$

donde n es el tamaño muestral a determinar, N es el tamaño poblacional (o universal), p es la proporción positiva de elementos (que tienen la característica solicitada) de la muestra de 31 elementos o más (tomada antes de poder estimar el n final), p es la proporción positiva de elementos de la población que tienen la característica que se evalúa, $1 - p$ es la proporción negativa de la población que no tienen la característica que se revisa, con $(p - p)$ como el error de precisión deseado; Z es el nivel de confianza a obtener con la distribución normal con una probabilidad de 100% menos $(p - p)$.

Tanto para valores como para proporciones de media, se debe cumplir que n de población infinita sea igual o mayor al 5% de la población total N, en su defecto se aplica entonces el cálculo con población finita, es decir primero se calcula n con infinita y luego con la finita.

(Levin, 1996)

Ejemplo 32 - Determinación del tamaño muestral para calcular medias

Se tienen 1289 rodamientos en diferentes máquinas de una empresa, se desea hacer muestreo para ver el estado en general de dichos elementos y para decidir cuánta cantidad mínima de rodamientos hay que medir para

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

concluir sobre el estado general de los mismos, usando técnicas predictivas de vibraciones.

Resultados de la muestra		Proporcional	Numérica
Ítem muestral	Elementos muestreados al azar (#)	Cumple (1) o no (0) el buen estado	Valor de una variable cualquiera medida en vibraciones
1	290	0	273.27
2	841	1	454.86
3	954	0	615.88
4	245	1	406.88
5	131	1	606.60
6	1059	0	106.62
7	522	0	208.79
8	970	0	930.55
9	345	0	989.82
10	1034	0	601.31
11	525	0	983.47
12	212	1	674.12
13	968	1	432.00
14	1187	1	769.30
15	20	1	946.17
16	126	0	642.00
17	29	1	379.89
18	1207	1	441.82
19	946	1	360.60
20	422	1	665.71
21	50	0	31.75
22	1082	1	983.58
23	772	0	902.98
24	981	1	122.48
25	357	1	692.96
26	701	1	216.39
27	949	0	724.85
28	835	0	908.94
29	971	1	229.83
30	656	1	196.76
31	1015	1	838.71

Cálculos para la determinación muestral de tamaño n de la prueba final

Media	0.5806	559.3187
Desviación estándar σ de la muestra	0.502	297.279
Proporción positiva	58.06%	
Proporción negativa	41.94%	
Población o Universo	1289	1289
Error de precisión máximo deseado	5%	
Rango de error permisible más o menos		67.118
		559.32 más o menos 67.12
Probabilidad (distribución normal)	12%	94%
Nivel Z deseado	-1.1750	1.5548
n con población infinita	134	47
Validación de si n es igual o mayor al 5%	No cumple la n de infinita	Cumple la n de infinita
n con población finita	122	46
	Proporciones	Valores
n final estimada	Se toma finita con n igual a	Se toma infinita con n igual a
	122	47
En este caso particular se toma la n mayor de las dos características	122	

Entonces para terminar la verificación general y poder concluir sobre el estado de los rodamientos, se deben analizar un total de 122 rodamientos (se pueden descontar los 31 que ya se tienen con medición de la muestra al azar), o sea que se requieren evaluar 91 adicionales a los de la muestra de 31 elementos realizada previamente. Para usar esta herramienta abra el siguiente programa de CD de determinación muestral.

Programa de CD 7 - Determinación de tamaño muestral para medias

Para seleccionar los rodamientos a muestrear se pueden usar los números aleatorios, que tienen la particularidad de que la probabilidad de ser seleccionados en una muestra es la misma para todos una vez se completan N (número total de elementos) muestras, además de que la forma en que se van tomando y seleccionando no debe cumplir con ninguna función matemática ni distribución ni relación formal establecida, siendo esta última particular su gran ventaja pues la muestra nunca es sesgada. Para ello se pueden usar los argumentos de función del Excel de Microsoft Office: ALEATORIO.ENTRE (mínimo valor deseado, máximo valor requerido), (que sirve para rangos de valores o cuando se desean números enteros) o ALEATORIO () que es útil para valores puntuales o números con decimales, también para determinar los números aleatorios se pueden usar las tablas de estos valores de libros de estadística o afines.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 101 - Tabla de distribución normal para probabilidades y Z

	Segunda cifra decimal del valor de Z									
Z	**0**	**0.01**	**0.02**	**0.03**	**0.04**	**0.05**	**0.06**	**0.07**	**0.08**	**0.09**
0.00	50.00%	50.40%	50.80%	51.20%	51.60%	51.99%	52.39%	52.79%	53.19%	53.59%
0.10	53.98%	54.38%	54.78%	55.17%	55.57%	55.96%	56.36%	56.75%	57.14%	57.53%
0.20	57.93%	58.32%	58.71%	59.10%	59.48%	59.87%	60.26%	60.64%	61.03%	61.41%
0.30	61.79%	62.17%	62.55%	62.93%	63.31%	63.68%	64.06%	64.43%	64.80%	65.17%
0.40	65.54%	65.91%	66.28%	66.64%	67.00%	67.36%	67.72%	68.08%	68.44%	68.79%
0.50	69.15%	69.50%	69.85%	70.19%	70.54%	70.88%	71.23%	71.57%	71.90%	72.24%
0.60	72.57%	72.91%	73.24%	73.57%	73.89%	74.22%	74.54%	74.86%	75.17%	75.49%
0.70	75.80%	76.11%	76.42%	76.73%	77.04%	77.34%	77.64%	77.94%	78.23%	78.52%
0.80	78.81%	79.10%	79.39%	79.67%	79.95%	80.23%	80.51%	80.78%	81.06%	81.33%
0.90	81.59%	81.86%	82.12%	82.38%	82.64%	82.89%	83.15%	83.40%	83.65%	83.89%
1.00	84.13%	84.38%	84.61%	84.85%	85.08%	85.31%	85.54%	85.77%	85.99%	86.21%
1.10	86.43%	86.65%	86.86%	87.08%	87.29%	87.49%	87.70%	87.90%	88.10%	88.30%
1.20	88.49%	88.69%	88.88%	89.07%	89.25%	89.44%	89.62%	89.80%	89.97%	90.15%
1.30	90.32%	90.49%	90.66%	90.82%	90.99%	91.15%	91.31%	91.47%	91.62%	91.77%
1.40	91.92%	92.07%	92.22%	92.36%	92.51%	92.65%	92.79%	92.92%	93.06%	93.19%
1.50	93.32%	93.45%	93.57%	93.70%	93.82%	93.94%	94.06%	94.18%	94.29%	94.41%
1.60	94.52%	94.63%	94.74%	94.84%	94.95%	95.05%	95.15%	95.25%	95.35%	95.45%
1.70	95.54%	95.64%	95.73%	95.82%	95.91%	95.99%	96.08%	96.16%	96.25%	96.33%
1.80	96.41%	96.49%	96.56%	96.64%	96.71%	96.78%	96.86%	96.93%	96.99%	97.06%
1.90	97.13%	97.19%	97.26%	97.32%	97.38%	97.44%	97.50%	97.56%	97.61%	97.67%
2.00	97.72%	97.78%	97.83%	97.88%	97.93%	97.98%	98.03%	98.08%	98.12%	98.17%
2.10	98.21%	98.26%	**98.30%**	98.34%	98.38%	98.42%	98.46%	98.50%	98.54%	98.57%
2.20	98.61%	98.64%	98.68%	98.71%	98.75%	98.78%	98.81%	98.84%	98.87%	98.90%
2.30	98.93%	98.96%	98.98%	99.01%	99.04%	99.06%	99.09%	99.11%	99.13%	99.16%
2.40	99.18%	99.20%	99.22%	99.25%	99.27%	99.29%	99.31%	99.32%	99.34%	99.36%
2.50	99.38%	99.40%	99.41%	99.43%	99.45%	99.46%	99.48%	99.49%	99.51%	99.52%
2.60	99.53%	99.55%	99.56%	99.57%	99.59%	99.60%	99.61%	99.62%	99.63%	99.64%
2.70	99.65%	99.66%	99.67%	99.68%	99.69%	99.70%	99.71%	99.72%	99.73%	99.74%
2.80	99.74%	99.75%	99.76%	99.77%	99.77%	99.78%	99.79%	99.79%	99.80%	99.81%
2.90	99.81%	99.82%	99.82%	99.83%	99.84%	99.84%	99.85%	99.85%	99.86%	99.86%
3.00	99.87%	99.87%	99.87%	99.88%	99.88%	99.89%	99.89%	99.89%	99.90%	99.90%
3.10	99.90%	99.91%	99.91%	99.91%	99.92%	99.92%	99.92%	99.92%	99.93%	99.93%
3.20	99.93%	99.93%	99.94%	99.94%	99.94%	99.94%	99.94%	99.95%	99.95%	99.95%
3.30	99.95%	99.95%	99.95%	99.96%	99.96%	99.96%	99.96%	99.96%	99.96%	99.97%
3.40	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.97%	99.98%
3.50	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%	99.98%
3.60	99.98%	99.98%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%
3.70	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%
3.80	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%

Por ejemplo el Z para una probabilidad del 98.30% es 2.12

El tamaño mínimo muestral que se usa en el ejemplo anterior es 31 elementos con el fin de cumplir con el mínimo muestral del teorema del límite central (Kume, 1992) (Levin, 1996), también se asume en todo lo expuesto sobre tamaños muestrales que el comportamiento de las variables medidas se asimila a una distribución normal. Para calcular el Z y/o la probabilidad en la distribución Z puede usar el programa en Excel en el CD adjunto que lo encuentra en Programa de CD 6 - Distribución Normal Z y Probabilidades, o usar la función del Excel descrita como DISTR.NORM.ESTAND.INV (introduzca probabilidad en porcentaje) para calcular el Z a partir de la probabilidad[214], como también puede calcular la probabilidad a partir de un Z dado, con la función de Excel DISTR.NORM.ESTAND (introduzca acá el Z).

5.5.6.6 Otras herramientas estadísticas

En las herramientas estadísticas en las secciones anteriores el autor no pretende ahondar en ellas, ya que existe suficiente bibliografía donde se tratan con profundidad y rigurosidad, más sin embargo trata de resaltarlas con el fin de divulgarlas y denotar su gran utilidad en las decisiones que se toman con los factores productivos, las acciones, las tácticas y las estrategias de mantenimiento; existen otras herramientas estadísticas que se pueden considerar como instrumentos avanzados tales como: análisis de varianza y covarianza, tabulaciones (simples, cruzadas, de valores medios, etc.), pruebas de hipótesis, pruebas t de medias, pruebas f, correlaciones (de rangos, lineales, otros), validaciones con el coeficiente alfa de Cronbach, análisis de regresiones múltiples, análisis discriminantes múltiples, redes neuronales, análisis de clasificación múltiple, análisis de componentes principales (*eigen-value* y *eigen-vector*), análisis factorial de correspondencias, análisis de grupos (*cluster analysis*) AID

[214] *Con el programa del CD adjunto o con el Excel, cuando la probabilidad es inferior al 50% le debe sumar 50%.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(*Automatic Interaction Detection*) y muchas más (Santesmases, 2003) que pueden ser consultadas en libros especializados y aplicarlas perfectamente a cualquiera de los cuatro niveles de mantenimiento y producción, como también a aspectos asociados a la calidad de los servicios prestados o bienes tangibles producidos.

5.6 Instrumentos avanzados específicos de mantenimiento - Nivel Instrumental

La herramientas avanzadas de que se dispone en mantenimiento, a pesar de que uso se puede extender a otros campos del conocimiento, es más usual que su aplicación sea específica y concreta en el campo de la ingeniería de fábricas, trátese de mantenimiento, confiabilidad, calidad, producción, ingeniería o de cualquiera de las áreas afines.

5.6.1 Análisis de Fallas - FMECA[215], RCFA[216] y RPN[217]

Los métodos para ahorrar recursos en mantenimiento pueden ser varios, pero entre ellos sobresalen dos: uno que consiste en ampliar los períodos entre mantenimientos planeados (esto se puede lograr mediante el control de los parámetros CMD, βeta y asociados, con el fin de que no se incrementen las fallas conocidas ni aparezcan nuevas en estos períodos de expansión entre tareas proactivas), y el segundo método y quizás el más exitoso para lograr grandes ahorros en mantenimiento es el análisis de fallas que sirve para erradicar o controlar fallas reales o potenciales en los elementos o equipos.

La metodología de análisis de fallas se constituye por sí misma en uno de los instrumentos avanzados de mantenimiento más útiles y usados en los niveles 2, 3 y 4. Tanto el *TPM* como el *RCM* lo aplican, más sin embargo es independiente de ellos, se aplica indiferente del nivel en que se encuentre la empresa y no pertenece a ninguna de las tácticas conocidas.

El *FMECA* presenta dos opciones: cuando se desconoce la causa de la falla y cuando se sabe de todas (o la mayoría) las fallas reales y/o potenciales con sus correspondientes causas. En el primero de los casos se utiliza la metodología de análisis de fallas y en la segunda se aplica el procedimiento *FMECA*. Es posible confundir este último con la metodología que usa el *RCM* para llegar a establecer el mapa (o matriz) o valoración del riesgo, existe una diferencia muy especial entre ambos sistemas, el *RCM* en su valoración de riesgos solo utiliza los parámetros de Severidad y Ocurrencia, mientras que el procedimiento *FMECA* usa tres parámetros: Severidad, Ocurrencia y Probabilidad de Detección, sin embargo la metodología es muy similar, como también lo son las tablas para su calificación en cada uno de los tres componentes descritos (que juntos conforman la base de evaluación del *RPN* (Stamatis, 1995)).

El costo de un minuto de falla es por lo menos diez veces superior al costo del mismo tiempo en operación normal, dependiendo de la tasa de rentabilidad bruta de la empresa, pero definitivamente un minuto de falla es varias veces más costoso que un minuto de producción corriente.

El análisis de fallas se inicia en la industria militar norteamericana hacia 1950, posteriormente hacia 1988 se utiliza en las grandes corporaciones americanas automotrices Ford, General Motors y Chrysler con estandarización de sus sistemas de calidad para las áreas de diseño y análisis de proceso dentro de la metodología *APQP* (*Advance Product Quality Planning*), en el año 1993 se introduce el *FMECA* en la norma SAE J-1739 mediante el apoyo de *AIAG* (*Automotive Industry Action Group*) y *ASQC* (*American Society for Quality Control*) (Ford, 1972) (Blanchard, 1995) (Stamatis, 1995).

Las fallas se clasifican internacionalmente en críticas, degradantes, incipientes y desconocidas según la Casa OREDA, en análisis de fallas se establecen dos tipos: crónicas y esporádicas; las primeras de ellas son las verdaderamente importantes ya que los tiempos de no funcionalidad que implican son mucho más grandes en el tiempo que los períodos no productivos de las esporádicas, aún siendo estas últimas más impactantes, dramáticas y preocupantes ante las directivas, pues son más visibles (OREDA, 2002).

Las fallas esporádicas son una desviación del estándar (por lo general hacia el límite inferior), en una operación

[215] *FMECA Failure Mode, Effects Causes and Criticality Analysis – Análisis de los Modos, los Efectos, las Causas y las Criticidades de las Fallas.*
[216] *RCFA Root Cause Failure Analysis – Análisis de la Causa Raíz de las Fallas.*
[217] *RPN - Risk Priority Number – Número de Riesgo Prioritario.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

normal (por lo general en el lado bajo). No siempre dejan secuelas en la producción y/o mantenimiento, una vez desaparece la causa de la falla, todo regresa a la normalidad. Casi siempre al eliminar una falla esporádica se regresa a una situación de funcionalidad normal (que normalmente no es mejor de la que se tiene antes de que ocurra). Estos son eventos por lo general poco frecuentes y casi nunca una falla esporádica se relaciona con otra del mismo tipo.

Las fallas crónicas son eventos muy frecuentes, cuando se eliminan o se controlan se logra restaurar la funcionalidad a su punto máximo y se eleva el nivel esperado del desempeño. Son repetitivas, no son dramáticas, casi siempre son fáciles de corregir, sin embargo son difíciles de controlar o erradicar (solo se puede lograr al aplicar análisis de fallas con la debida componente de ingeniería), se aceptan como parte normal de los costos de producción. Afectan de forma inmediata la producción y/o el mantenimiento. Ejemplo de ellas son las fallas que se presentan en los rodamientos, los sellos, las correas, los engranajes, las interrupciones de los sistemas de control o potencia, los problemas comunes y corrientes de la unidad de producción, etc.

Cada evento de falla crónica o recurrente tiene un impacto relativamente bajo, pero cuando se totaliza en el transcurso de un período de tiempo y se combina con otras fallas crónicas, afecta de forma muy notoria la economía de la empresa. Al encontrar la causa raíz de las fallas crónicas y controlarla, se logra aumentar la productividad, elevar los índices de CMD, mejorar la rentabilidad y el desempeño, se maximiza la productividad y por ende la competitividad, situación que no sucede en las esporádicas.

Ilustración 102 - Aplicabilidad de FMECA y RCM según falla y causa

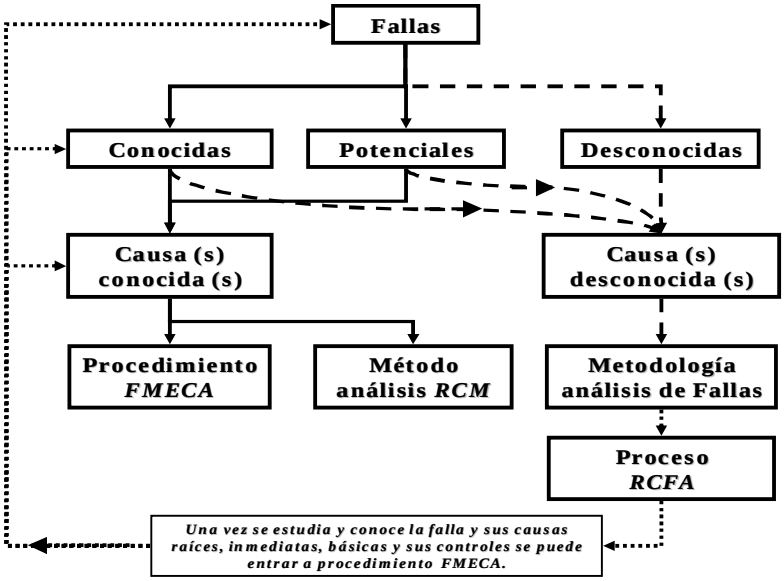
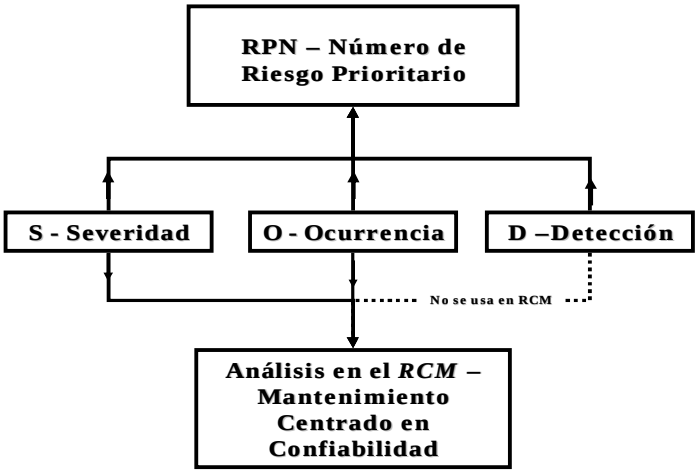
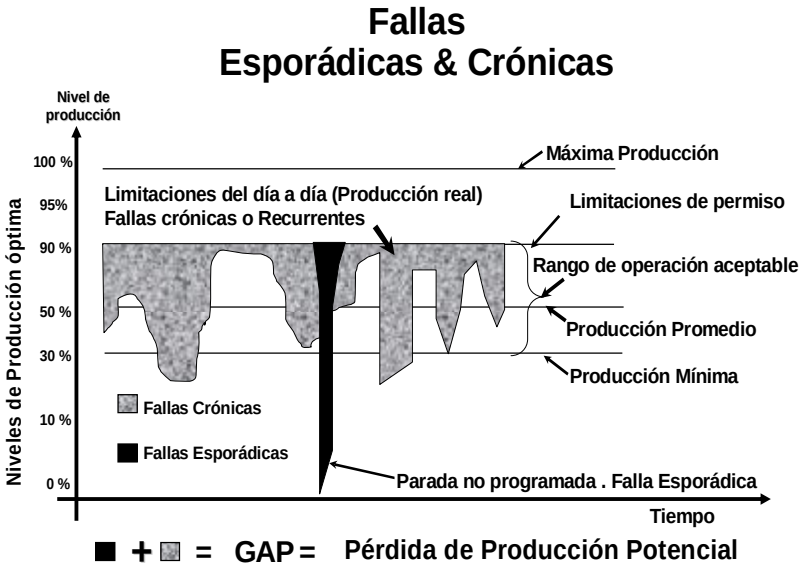


Ilustración 103 - Diferencia entre RCM y FMECA, con relación a parámetros que usan



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 104 - Fallas crónicas frente a Fallas Esporádicas



El área bajo la curva máxima de producción marcada correspondiente a las fallas crónicas o recurrentes es mucho mayor que la línea negra debida a paradas no programadas esporádicas, es por esto entonces que se debe primero intentar eliminar o controlar a las fallas crónicas, pues estas inciden mucho más en la rentabilidad de la empresa.

5.6.2 Metodología Análisis de Fallas

El propósito de la técnica de análisis de los efectos, los modos y las causas de fallas es poder conocer completamente el equipo entero mediante la identificación de los sistemas y de los componentes que lo conforman, el diseño, los procesos, los elementos y los materiales de fabricación, los ensambles y los sub-ensambles parciales, así como todos los demás aspectos pertinentes que permitan aplicar el análisis integral de fallas (Harris, 1994).

Por medio del análisis de fallas se puede detectar en forma preventiva, predicativa o anticipada cualquier anomalía que ocurra a futuro, en la funcionalidad del equipo, para ello se siguen una serie de pasos, que se describen más adelante.

Es un proceso sistémico que permite identificar las fallas potenciales o reales de diseño, de funcionamiento y de proceso antes de que estas ocurran, con la intención de eliminarlas o controlarlas para erradicar o minimizar los riesgos asociados con ellas. Su aplicación permite documentar las tareas proactivas y correctivas que controlan o eliminan las fallas.

El instrumento avanzado de análisis de fallas (enfocado a erradicar o controlar la causa raíz del problema), se debe abordar bajo la óptica de modelos de causalidad, el cual implanta algunos pasos, entre ellos sobresalen el establecimiento del método apropiado, la construcción de los procesos de solución, configuración del GCF[218][219] con sus metodologías de pensamiento, el planteamiento y el desarrollo del análisis en sí y por último la implementación de los controles.

---

[218] *GCF Grupo Caza-Fallas.*

[219] GCF - Grupo Caza-Fallas**.** En la conformación del Grupo Caza-Fallas GCF, debe tenerse cuidado de que haya personas con experiencia y conocimientos muy específicos y profundos en algunos temas, de las causas de fallas. Por ejemplo, los elementos mecánicos, eléctricos o electrónicos tienen formas particulares y ya identificadas de fallas, lo mismo en el caso de las fallas debidas a la lubricación, al montaje o al diseño de los elementos o equipos. Cuando no existe ese conocimiento se corre el peligro de achacar fallas en forma equivocada a alguno de los elementos de análisis y por consiguiente nuestro análisis de fallas no va a conducir a los resultados esperados (detección y corrección de la causa raíz)(Benítez, 2007).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 105 - Modos de Fallas y sus lazos

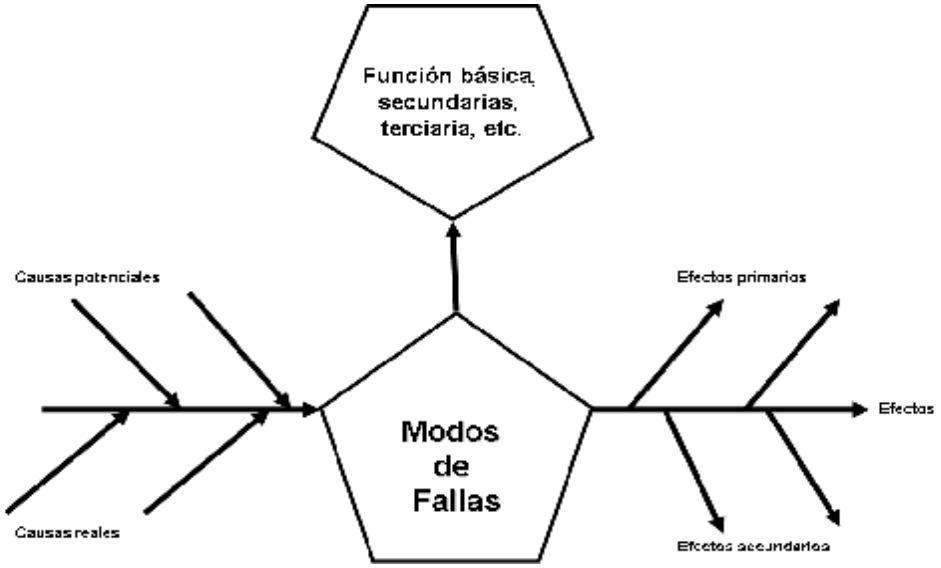
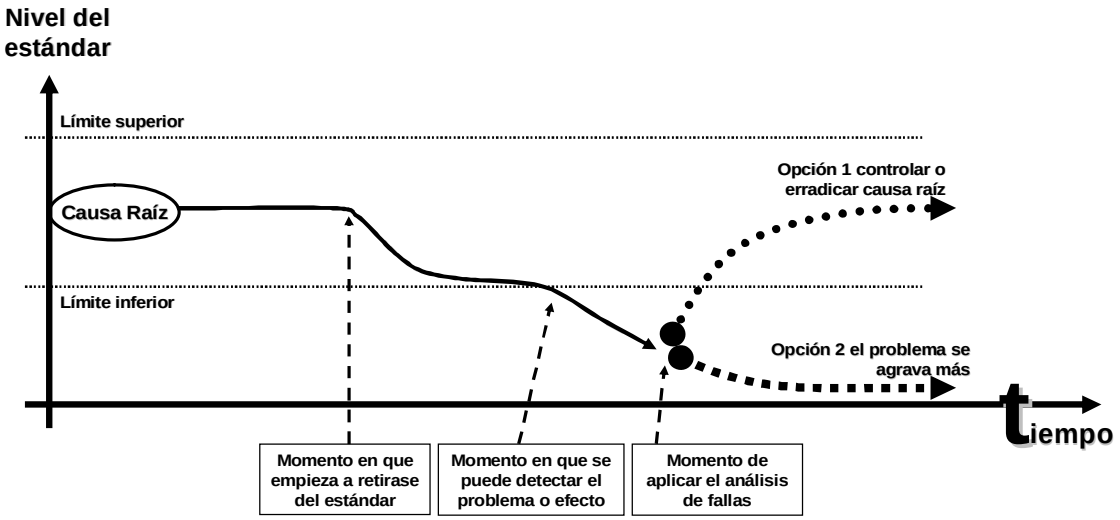


Ilustración 106 - Condiciones estándares en fallas

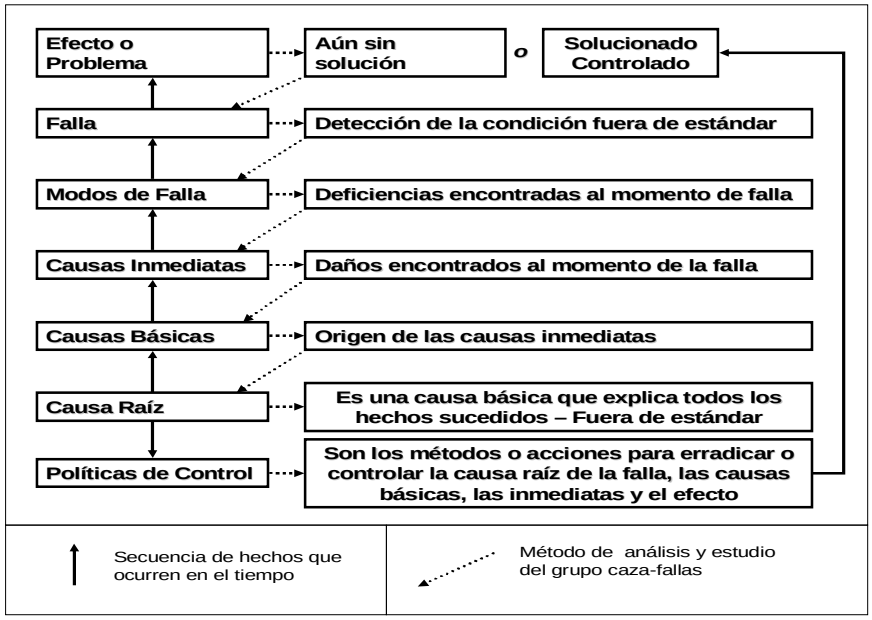


La metodología de análisis de fallas parte de la base de la presencia o detección repentina de una situación fuera del estándar, que manifiesta de alguna forma la falta de funcionalidad total o parcial de una máquina o elemento. Se describe como problema o efecto causante, a una falla que aún no se soluciona o erradica. Se puede enunciar como modo de falla a las deficiencias que se observan o se perciben en el sistema o máquina al momento de reportar la falla.

Las causas inmediatas se refieren a los daños y hechos que se encuentran en el equipo al momento de percibir o reportar la falla. Las causas básicas son el origen de las causas inmediatas. Una o varias causas básicas que generan el problema por medio del cual se detecta la falla y que a la vez ocasiona la pérdida de funcionalidad del sistema o elemento, recibe el nombre de causa raíz. La criticidad o grado del problema se asocia a la clase de falla. El elemento que entra en estado de falla se denomina como ítem susceptible de mantenimiento.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 107 - Proceso de Análisis de Fallas



Las consecuencias de una falla no solo son la falta de funcionalidad, en ocasiones pueden producir daños al medio ambiente, pérdidas de vida humana o animal, siniestros parciales o totales a personas, daños a bienes materiales o a servicios, entre otros.

El análisis de fallas es un proceso sistémico que perdura en el tiempo, es de acción permanente, el grupo caza-fallas se reúne en forma constante y periódica, se debe mantener un registro activo en tiempo real de todos los hechos, acciones, análisis de fallas, evidencias, controles, registros, datos, etc.

El grupo caza-fallas está conformado por varias personas de todos los niveles jerárquicos (verticales) de la organización y con representación de la mayoría de áreas de la empresa, como: producción, ingeniería, mantenimiento, calidad, compras, almacenes, contabilidad, mercadeo, administración, finanzas, sistemas de información, etc., de tal forma que siempre en los tiempos de operación de los equipos haya suficientes personas del grupo (miembros principales o suplentes) caza-fallas que puedan iniciar los procesos de registro, recolección y cuidado de evidencias, los análisis de fallas, la implementación y la vigilancia de los controles establecidos como también las demás acciones propias del método; esto a su vez implica que en todo momento en las áreas físicas de producción o mantenimiento existan instrumentos que permitan recoger las evidencias como cámaras digitales, computadores en línea, grabadoras, herramientas, etc.; dado que estos elementos son vitales a la hora de aplicar la metodología pues se constituyen en la base técnica de estudio.

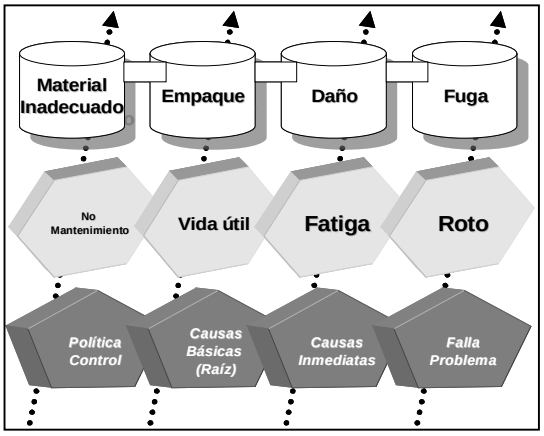
Es importante resaltar que la metodología de fallas funciona siempre y cuando, dentro de los procesos de análisis se aplique ingeniería u otras áreas del conocimiento, con el fin de poder determinar las causas inmediatas, las básicas y la causa raíz; es imposible encontrar la fuente de los problemas con el conocimiento normal y sentido común que se maneja en forma habitual en las empresas, un síntoma normal en las empresas que no practican la metodología es que en la mayoría de los problemas que se evalúan, al momento de tratar de encontrar las causas escasamente se llega hasta las inmediatas y en algunos eventos hasta algunas básicas que no son exactamente la causa raíz, por lo general en estas empresas no se dispone de tiempo para la metodología y esto sirve como excusa y barrera para no utilizar el método.

Ejemplo 33 - Ejemplo simple de análisis de fallas.

Un compresor de aire sale de servicio en forma automática porque su sistema de control detecta una temperatura muy alta, esto parecer ser debido a una fuga de aceite muy seria, a través de la unión de una de sus mangueras del lubricante en el acople. El compresor no tiene equipo de respaldo en *stand-by*. Es la cuarta vez que ocurre en un período de tiempo muy corto.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Situación estándar	: temperatura en su rango normal y el equipo funciona bien
Período de evaluación	: últimas siete días
Clase de equipo	: Compresor de aire comprimido, versión de tornillo con aire exento de aceite, para uso grado alimenticio
Modo de falla	: OHE (Casa OREDA) Sobrecalentamiento con alto registro de temperatura que activó el sistema de protección, apagándolo
Categoría de equipo	: Marca *Eagle* Serie U87A90 (Hipotético)
Severidad	: I *Incipient* - Incipiente
Causa Inmediata	: Fuga de aceite lubricante
Parte que falla	: Unión (Acople) de la manguera superior de aceite
Causa básica	: Material Inadecuado del empaque, con cambios de especificaciones de material y propiedades físico-mecánicas desde hace seis meses, por departamento de suministros, sin autorización de ingeniería
Método de detección	: Automático - producción reporta máquina llenadora de jugos, detenida por falta de presión de aire
Tarea de mantenimiento a realizar	: análisis de falla con mantenimiento correctivo modificativo
Actividad realizada	: Modificación con rediseño del material de empaque de la unión acople en la manguera
Área del conocimiento e ingeniería	: se usa análisis de fallas con ingeniería de materiales y procesos
Controles	: solo comprar nuevos empaques con ficha y especificación técnica, solo a dos proveedores autorizados, especificaciones técnicas similares a las originales, certificado de garantía técnica de los empaques que se compran, solo Ingeniería está autorizado a a cambiar especificaciones técnicas del empaque, cada dos años enviar empaque muestra a casa matriz del compresor para verificar calidad



La capacitación previa, intensiva y con suficiente tiempo de duración de los miembros principales, suplentes e invitados del grupo caza-fallas es fundamental en el éxito del proceso, estas personas deben manejar todo el enfoque sistémico de mantenimiento, los tipos de acciones (correctivos, preventivos, etc.), diferentes tácticas (como *TPM*, *RCM*, proactiva, reactiva, entre otros), muchos de los instrumentos avanzados de mantenimiento, deben tener un entrenamiento suficiente en el método en sí y en general deben practicar mucho como grupo activo de análisis de fallas en forma permanente, con entrenamiento periódico tanto en áreas de ingeniería de diseño, como de calidad, mantenimiento, operación y otras relevantes al tipo de problemas de esa empresa en particular.

Ilustración 108 - Método de análisis de fallas, formato de registro

A – Identificación del problema o mejora a realizar (definir límites técnicos y físicos del problema) : _____

B – Beneficios económicos, técnicos, productivos, etc. de analizar el problema o mejora, mediante el método de análisis de fallas para encontrar la Causa Raíz - _____

C – Desarrollo del análisis:

C – 1) Estándar - Desviación - Condiciones encontradas fuera del estándar - Falla - _____

C – 2) EVIDENCIAS - Especificación Técnica (datos, planos, fotografías, evidencias reales y verbales, cálculos, verificaciones, estudios, normas, procedimientos de calidad, otros, etc.) con que se cuenta: - _____

C – 3) Procedimiento:

C – 3 – A) Plantear diferentes

Posibles Causas Inmediatas: _____

1 - _____
2 - _____
3 - _____

Básicas:

1 - A - _____
1 - B - _____
1 - C - _____
1 - ... - _____
1 – n - _____

2 - A - _____
2 - B - _____
2 - C - _____
2 - ... - _____
2 – n - _____

3 - A - _____
3 - B - _____
3 - C - _____
3 - ... - _____
3– n - _____

y así sucesivamente hasta completar varias básicas de cada una de las inmediatas.

C – 3 – B) Pruebas de Validez de cada una las Causas básicas planteadas en el paso anterior: _____

C – 3 – C) Selección de la Causa Básica planteada y probada técnicamente como Raíz, que a su vez explica todos los hechos ocurridos: _____

C – 3 – D) Hechos y cálculos de ingeniería que comprueban técnicamente la Causa Raíz como causante de toas las situaciones encontradas durante los hechos y el análisis –

Bitácora de Cálculos – Técnicas utilizadas

Síntesis del análisis técnico de la causa raíz: _____

C – 5) Actuaciones a realizar (Política de Control) que garantice erradicación o control de la Falla:

C – 5 – A) Sobre la Falla: _____

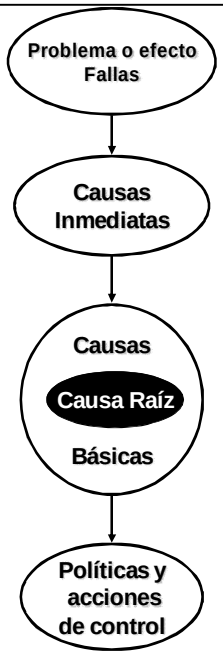
C – 5 – B) Sobre la Causa Inmediata Única: _____

C – 5 – C) Sobre la Causa Básica Única: _____

C – 5 – D) Implementación de Controles:

Tareas y responsables, recursos, controles y nuevas mediciones para verificar validez del control aplicado.

Falla a resolver y a erradicar: _____



Participantes en el Grupo Caza-Fallas del día___ mes ____ año_____, en el caso número:_____ sobre la falla:_____ en la máquina:_____ en la empresa de: _____

Persona: _____	**Sombrero:** _____	**Función:** _____	**Dpto.:** _____
Persona: _____	**Sombrero:** _____	**Función:** _____	**Dpto.:** _____
Persona: _____	**Sombrero:** _____	**Función:** _____	**Dpto.:** _____
Persona: _____	**Sombrero:** _____	**Función:** _____	**Dpto.:** _____
Persona: _____	**Sombrero:** _____	**Función:** _____	**Dpto.:** _____
Persona: _____	**Sombrero:** _____	**Función:** _____	**Dpto.:** _____
Persona: _____	**Sombrero:** _____	**Función:** _____	**Dpto.:** _____
Persona: _____	**Sombrero:** _____	**Función:** _____	**Dpto.:** _____
Persona: _____	**Sombrero:** _____	**Función:** _____	**Dpto.:** _____
Persona: _____	**Sombrero:** _____	**Función:** _____	**Dpto.:** _____
Persona: _____	**Sombrero:** _____	**Función:** _____	**Dpto.:** _____

Facilitador externo: _____ **Sombrero:** _____

Facilitador interno – Coordinador: _____ **Sombrero:** _____

Invitados: _____ **Sombrero:** _____
_____ **Sombrero:** _____
_____ **Sombrero:** _____
_____ **Sombrero:** _____

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Los procesos de análisis de fallas se originan en las personas y se desarrollan a partir de las ideas que aportan en particular cada uno de los miembros del GCF[220]; estos procesos de pensamiento son vitales en el análisis y se pueden guiar con los roles que las diferentes personas juegan en las reuniones (Stamatis, 1995).

Ilustración 109 - Identificación de los roles en los grupos caza-fallas, mediante sombreros

Sombrero	Descripción	Rol
Blanco	Neutral	Hechos, cifras, información objetiva. No hace interpretaciones ni da opiniones
Rojo	Emotivo	Emociones y sensaciones sentimientos Así me siento con respecto a este asunto
Negro	Crítico Negativo	Lógico negativo Señala riegos y peligros Identifica errores
Amarillo	Crítico Positivo	Lógico positivo constructivo optimista Abarca espectro positivo desde el lógico hasta visiones y esperanzas
Verde	Creativo	Creatividad, Ideas nuevas. Hace falta ir más allá de lo conocido, lo obvio y lo satisfactorio El lenguaje del movimiento reemplaza al del juicio
Azul	Facilitador	Control de los demás sombreros y pasos para pensar Define el tema. Síntesis, visión global y conclusiones Asegura el respeto por las Reglas de juego

El hecho de usar un sombrero permite centrar y enfocar mejor el pensamiento, si se cambia de sombrero se puede reorientar la idea, si el pensamiento se precisa la argumentación del miembro caza-falla resulta más productiva (De Bono, 2003). La idea es que los miembros asuman al menos uno de los roles en las reuniones, puede ser cambiante durante la sesión y entre reunión y reunión.

El grupo caza-fallas se debe constituir por un número suficiente de personas (al menos nueve personas, entre principales, suplentes, permanentes e invitados), se pueden trabajar varios grupos en simultáneo que analizan fallas diferentes. El equipo para el análisis de fallas, para *RCFA* y *FMECA* puede estar constituido por operadores, técnicos, supervisores, ingenieros, analistas, directivos, proveedores, clientes, especialistas, inspectores, etc. con representación permanente de mantenimiento, producción, ingeniería, compras, administración, finanzas, etc., debe contar con un líder facilitador permanente que coordina todas las actividades.

Cada grupo de análisis varía en función de la falla que se analice y cuenta con los miembros más cercanos al problema y los más pertinentes en razón a cada caso en particular. En cada sesión se debe llenar un informe como el de la Ilustración 108 - Método de análisis de fallas, formato de registro.

Un análisis de una falla puede durar varias sesiones hasta llegar a la causa raíz y a la implementación efectiva. El modelo de trabajo se puede basar en el método del Vaticano, donde todos los participantes aportan ideas, no existen las contradicciones personales, sino que lo que se debate son las ideas, y es alrededor de ellas que se debe centrar el análisis, cada miembro participa en forma equitativa con voz y voto indiferente del cargo que desempeña en la empresa, las jerarquías de los miembros no pueden influenciar el análisis ni el método de trabajo aún en el evento en que se trate de subalternos o jefes, miembros del grupo. Uno de los métodos más exitosos para el análisis de fallas y su manejo grupal, es el Método prospectivo del Vaticano (Mora, 2007c).

[220] *GFC – Grupo Caza-Fallas*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Programa de CD 8 - Casos reales de Análisis de Fallas

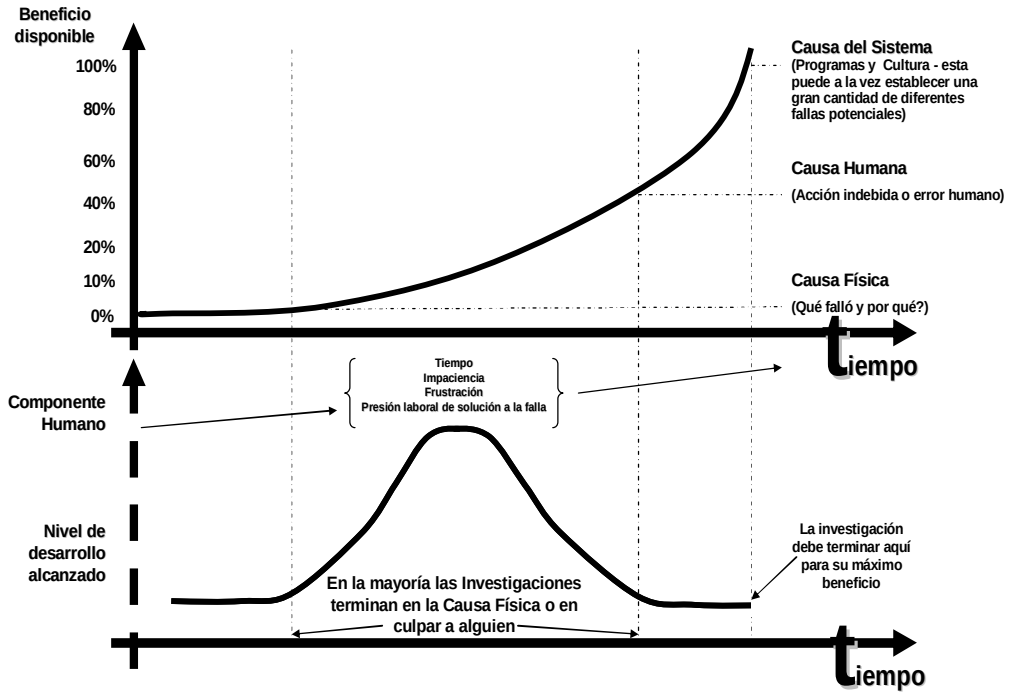
5.6.2.1 RCFA

El análisis de causa raíz de las fallas es un método riguroso para la solución de problemas en cualquier tipo de falla, se basa en un proceso lógico y en la utilización de árboles de causas de fallas, consiste en una representación visual de los eventos de una falla, en el cual por razonamiento deductivo y mediante la verificación de los hechos que ocurren se puede llegar de una manera fácil y fluida a las causas originales de las fallas.

Con el *RCFA* se puede llegar a deducir hasta tres niveles de causa raíz. Permite aprender de las fallas mediante la eliminación de las causas, en vez de corregir los síntomas. El método *RCFA* es una ayuda complementaria al método de análisis de falla que perfecciona las etapas requeridas en él, para encontrar las diferentes causas inmediatas, básicas y raíz.

Las ventajas que presenta el método son: permite establecer un patrón de fallas en elementos o máquinas, aumenta la motivación del recurso humano del grupo caza-fallas ya que en la mayoría de los casos es muy exitoso en la búsqueda de causas raíces, mejora las condiciones ambientales de trabajo, como también las de seguridad industrial y reduce sustancialmente los tiempos de no funcionalidad y de no disponibilidad en los equipos.

Ilustración 110 - Actuaciones en el RCFA



El nivel de desarrollo en la búsqueda de la causa raíz se incrementa paulatinamente hasta alcanzar un valor máximo en el grupo caza-fallas, aproximadamente en la mitad total del período a desarrollar el *RCFA*, este nivel empieza a generar saturación en los miembros del equipo, incrementando gradualmente sus niveles de impaciencia y frustración, a la vez que empiezan a sentir la presión en la búsqueda de resultados concretos, de allí se deduce la conveniencia de manejar tiempos prudenciales en las diferentes etapas de proceso.

El beneficio se incrementa en la medida que transcurre el tiempo, sin convertirse en norma, se puede plantear que los tiempos que toma el *RCFA* para casos particulares de falla puede tomar entre uno y cuatro meses en promedio, dependiendo de las habilidades de las personas del grupo caza-fallas, de la cantidad de reuniones y del conocimiento técnico que se maneje; aunque puede diferir de una empresa a otra.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Los sistemas empresariales por sí solos, no cambian, se les debe intervenir desde adentro o desde afuera con factores exógenos, mediante la incorporación de grupos caza-fallas, análisis de causa raíz, *RCFA* y demás condiciones necesarias para poder encontrar la raíz de los problemas, es decir, es casi imposible encontrar una causa raíz con las condiciones habituales y normales de una empresa; habitualmente las organizaciones se conforman con encontrar las causas inmediatas y esporádicamente algunas básicas, pero sin un proceso de análisis de fallas y de *RCFA*, sin utilizar los fundamentos de la ingeniería o de otras ciencias, es prácticamente improbable alcanzar la raíz de las fallas.

Aunque ya está descrito anteriormente se recalca que los métodos de análisis de fallas y *RCFA* se deben usar más en las fallas crónicas o recurrentes.

Los pasos que se desarrollan en la metodología *RCFA* para encontrar la causa raíz de las fallas son:

- Responder a una condición fuera de estándar y conservar la mayor cantidad de evidencias válidas posibles.
- Organizar el grupo caza-fallas que opere bajo un sistema de análisis de fallas y de *RCFA*.
- Analizar la falla y verificar las causas raíces.
- Comunicar los resultados.
- Implementación, monitoreo y nuevo análisis *RCFA* después de un tiempo prudencial.

El paso 1 considera que las condiciones humanas fuera de estándares como accidentes, lesiones, etc. son prioritarias en las acciones de los grupos caza-fallas bajo la metodología *RCFA*; también la restauración de equipos a sus condiciones estándares deben considerarse como relevantes.

Las evidencias se deben conservar, tales como: fotografías, filmaciones, elementos dañados, mediciones al momento del evento, conversaciones con las personas involucradas en la falla, circunstancias propias y exógenas, informes del suceso, etc.; las evidencias son vitales en los procesos exitosos de análisis de fallas y de *RCFA*; se deben facilitar los medios para que cualquier miembro del grupo caza-fallas que esté cercano al sitio del suceso en el momento en que este ocurra pueda reunir las pruebas circunstanciales del hecho, por eso es necesario que todos los turnos de operación de las empresas estén cubiertos por diferentes miembros del GCF; por lo cual se deben mantener cámaras, filmadoras, formatos, cintas de aislamiento de sitio, etc. en puntos estratégicos de la empresa que permitan la fácil recolección de evidencias en el momento en que sucedan las fallas. En las fallas esporádicas se debe acordonar el sitio con cinta de aislamiento, mientras que en las recurrentes se deben recoger la mayor cantidad de pruebas.

En el paso 2, se debe mantener un GCF permanente, con reuniones periódicas, con suficientes miembros principales y suplentes, que cubra la mayor cantidad de operaciones de la empresa, sus miembros deben tener un completo entrenamiento tanto en análisis de fallas, en *RCFA* y en los procesos técnicos que se desarrollan en la empresa, con un adecuado conocimiento de todos los equipos relevantes de la organización. Al menos una persona del GCF debe ignorar los eventos de la falla y actuar como crítico constructivo con respecto a una de las teorías y posibilidades que surjan de la tormenta de ideas o con el método del Vaticano. Se debe promover el pensamiento no formal que facilite la discusión de ideas no convencionales. El GCF debe tener un líder permanente con suficiente carisma y entrenamiento, debe tener representante de todos los niveles jerárquicos verticales y organizacionales horizontales de la empresa. El GCF debe contar con una adecuada sala de reuniones con todos los recursos necesarios que propenda la realización de las diferentes tertulias y facilite la aplicación del método del Vaticano en las diferentes prácticas de análisis de fallas y *RCFA*.

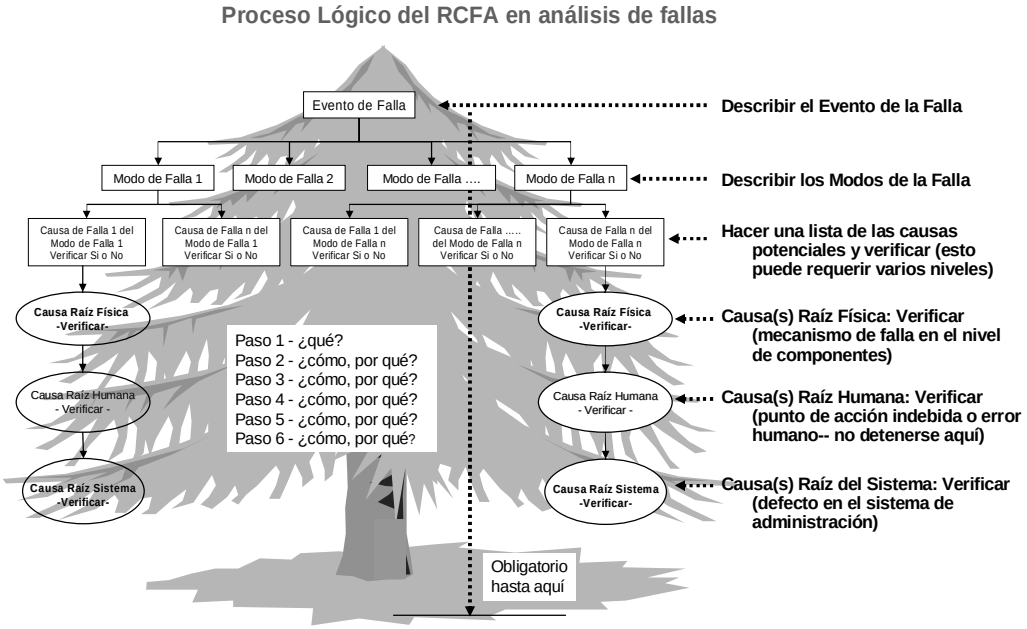
El punto 3 implica seguir la metodología planteada para hallar las causas inmediatas, las básicas, la raíz y definir las políticas de control necesarias, con el fin de asignar responsabilidades y recursos a las personas competentes que garanticen el control o la erradicación de la cusa raíz. Se lanzan hipótesis y estas se van comprobando una a una, debe validar todos los hechos hasta allí descritos para que se convierta de inmediata a básica y de básica a raíz.

El paso 4, implica que toda la información quede plasmada en medios físicos y electrónicos, en documentos, en informes, en el ordenador, en comunicaciones verbales y escritas, etc.; todas las causas básicas e inmediatas como la raíz deben ser suficientemente divulgadas a todo el personal pertinente para queden en la historia de las personas de la empresa y no se vuelvan a presentar.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

El último hecho, que es el paso 5 consiste en vigilar permanentemente la implementación de las políticas, las acciones y los controles conducentes a la erradicación o control de la falla, su monitoreo y su medición de efectividad de las soluciones practicadas, al cabo del tiempo se debe revisar el *RCFA* del mismo caso y comprobar que todo esté dentro de los estándares de funcionamiento (físicos, humanos y del sistema) y con las políticas de control, marchando (Wilson, y otros, 1993).

Ilustración 111 - Árbol Lógico en el RCFA



La implementación de la metodología *RCFA*, sigue las siguientes etapas:

Ilustración 112 - Etapas de implementación del RCFA

A. Describir el evento de la falla en forma clara y concisa
B. Reunir las evidencias circunstanciales y propias del evento
C. Realizar la tormenta de Ideas sobre las causas de la falla o aplicar el Método Vaticano
   a. Detectar las causas posibles de fallas
   b. Verificar las causas de las fallas
D. Encontrar la causa raíz y verificarla, que explique todos los hechos que suceden
E. Determinar la posible causa raíz humana y verificarla
F. Determinar la factible causa raíz latente y verificarla
G. Comunicar los resultados y las recomendaciones de control diseñadas
H. Monitorear, vigilar, hacer el costeo final y establecer un seguimiento hasta la erradicación o control total de la falla

La aplicación de este proceso *RCFA* puede ser observada en la presentación de power point en el CD adjunto bajo la denominación Programa de CD 9 – Aplicación de RCFA, donde se entregan cada una de las etapas del procedimiento *RCFA* con sus detalles y explicaciones, al igual en la última diapositiva se dan algunos links de documentos alusivos a *RCFA*, que presentan un buen grado de importancia; con lo cual se conceptualiza completamente la implementación del *RCFA* y del análisis de fallas.

Programa de CD 9 - Aplicación de RCFA

5.6.2.2 Procedimiento FMECA – RPN

El procedimiento *FMECA* tiene como función principal organizar todas las tareas correctivas, modificativas o proactivas a realizar de mantenimiento, después de haber realizado exhaustivamente el análisis de fallas y el

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

RCFA, el método procedimental *FMECA* parte del concepto de que ya se conocen todas las fallas reales y potenciales, se sabe de los modos de fallas en que se pueden presentar y se tiene un perfecto dominio de todas las funciones principales y auxiliares de los elementos o máquinas a evaluar con el procedimiento. Por su parte el *RPN* lo que hace es jerarquizar cada una de las tareas a realizar en los diferentes elementos o equipos, con el fin de priorizar los esfuerzos en los equipos que más lo requieran acorde a su grado de criticidad.

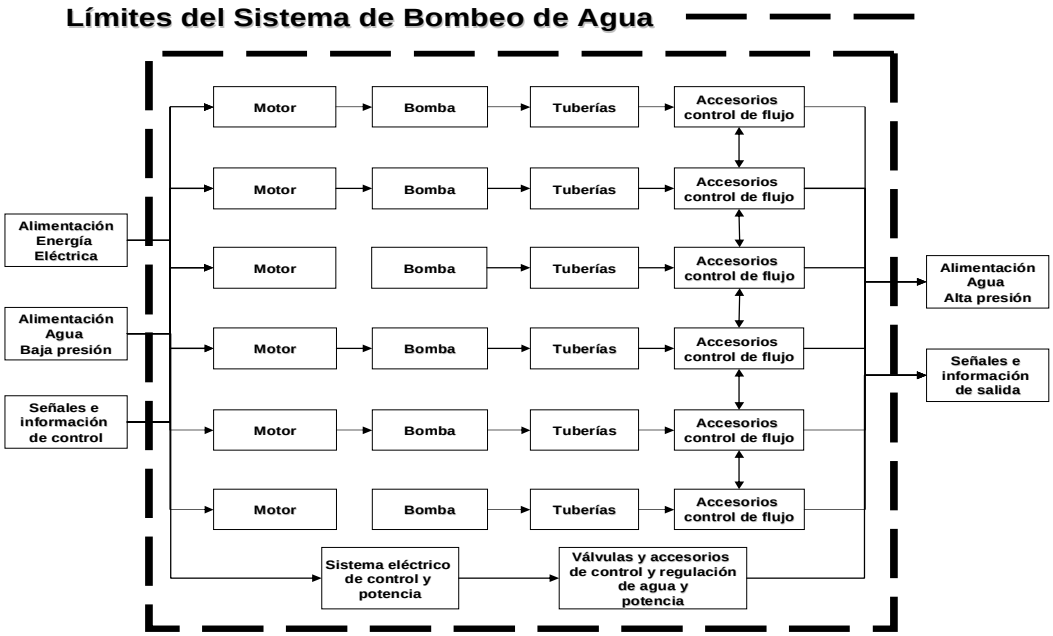
El procedimiento *FMECA* se puede aplicar en forma independiente[221], más sin embargo el RPN es parte fundamental del *FMECA*.

Las etapas de desarrollo del procedimiento *FMECA* son:

- Describir las funciones: primaria y secundarias de los equipos.
- Establecer todas las fallas funcionales reales y potenciales conocidas.
- Los modos de fallas
- Evaluar las consecuencias y los efectos de cada modo de falla, con su falla y su función.
- Medir el *RPN* mediante la evaluación de la severidad, la probabilidad de ocurrencia y la posibilidad de detección.
- Establecer las acciones correctivas o planeadas. Proactivas
- Realizar las tareas
- Medir nuevamente el *RPN* y replantear las acciones

Inicialmente, se debe definir el volumen de control del elemento o máquina a evaluar, la recomendación es comenzar con equipos conocidos de mediana criticidad e importancia, que sean bien conocidos por el GCF, para que todo el mudo participe y sirva de plan piloto en el aprendizaje y dominio del procedimiento *FMECA*. El volumen de control define los elementos a ser estudiados y solo se tienen en cuenta los que están considerados dentro de los límites establecidos.

Ilustración 113 - Volumen de control del Sistema



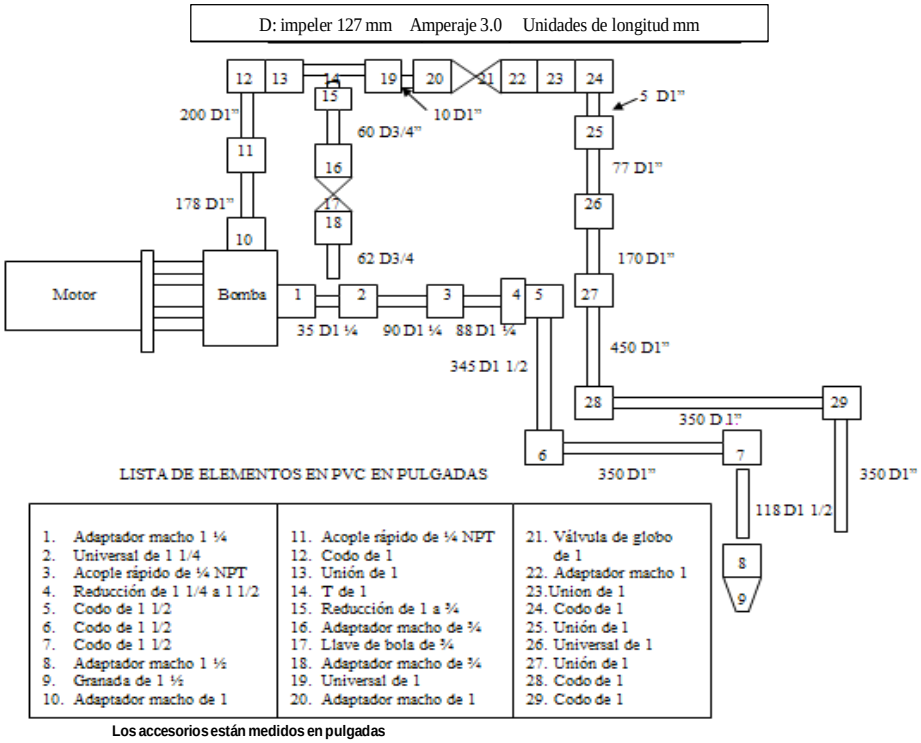
[221] *Una vez se conozcan todas las fallas reales o potenciales, para lo cual es posible haber utilizado el análisis de falla y/o el RCFA en forma previa; aunque no es realmente indispensable, pues se pude tener un dominio completo de las fallas sin tener necesariamente que haber aplicado los dos métodos descritos en forma total.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(Mora, 2007a)

Se establecen posteriormente las fronteras del sistema a evaluar, mediante los límites y las condiciones de entrada y salida como las unidades y los elementos que las componentes

Ilustración 114 - Algunos componentes del Sistema



A continuación se describen las unidades que componen el sistema principal:

- Bomba
- Motor
- Tubería y accesorios de agua
- Tablero de control y potencia eléctrica
- Componentes de apoyo para el control de agua o electricidad

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Cada unidad a su vez está compuesta por elementos, en las siguiente ilustración se muestran en fotos, varios de los elementos que componen algunas de las unidades del sistema principal.

Ilustración 115 - Algunos componentes de Unidades

(Mora, 2007b)

En cada elemento, unidad y sistema se denotan las características técnicas, por medio de las cuales se pueden identificar las fallas funcionales, los modos de fallas y las funciones.

Ilustración 116 - Características técnicas de algunos elementos, unidades o sistema

Unidad	Componente	Descripción	
Sistema Bombeo	Bomba	Caudal - Q	Hasta 20 galones por minuto
		Presión - H	Hasta 74 psi.
		Temperatura - T	Entre -30° y 100 ° centígrados
		Rotación - RPM	Hasta 3200
		Presión salida Ps	Hasta 220 psi.
	Motor	Tensión Nominal	230 voltios
		Corriente	3.1 amperios
		Potencia	0.9 kilowatios
		Coseno Phi	0.86
		Frecuencia	60 Hertz
		Rotación - RPM	3420

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Luego se describen las condiciones ambientales (condiciones físicas y climáticas exógenas e internas de los fluidos que tienen lugar en el proceso) y operativas (variables propias y externas de la producción y el medio empresarial); en el caso particular del sistema de bombeo:

- Condiciones ambientales: las bombas y los motores operan a la intemperie al aire libre con temperaturas exteriores entre 14 y 28 grados centígrados, con una humedad relativa entre 65 y 85%, el agua es de recirculación permanente lo que hace que se endurezca en forma constante, cada seis meses se le hace tratamiento químico al agua, el agua es utilizada en otros procesos de laboratorios académicos.

- Condiciones operacionales: el sistema funciona en forma continua todo el tiempo, en un sistema cerrado de succión compresión descarga, operan cinco bombas en paralelo en forma permanente y una adicional permanece en stand-by.

Los factores claves en los cuales opera el sistema o equipo, se denominan de contexto operacional, entre los más relevantes, sobresalen:

- Procesos de producción por lotes o continuos
- Redundancia de equipos o elementos
- Estándares de Calidad
- Estándares de Servicio al cliente
- Estándares medio ambientales
- Riesgos para la seguridad
- Turnos de trabajo
- Productos en proceso
- Tiempos de reparación
- Repuestos
- Demanda del mercado
- Suministro de materias primas
- Documentación del contexto operacional
- Otros relevantes a la operación específica

El siguiente paso consiste en describir las funciones del equipo, tanto la principal (primaria) como las secundarias:

- La función primaria es la razón de ser del mismo, es la que explica porque es adquirido el equipo y la misión que debe cumplir[222] dentro del proceso productivo, normalmente es la salida principal del sistema (producto del sistema). En la mayoría de las veces la función primaria es el verbo del nombre del equipo, por ejemplo en un compresor la función primaria es comprimir, en una licuadora licuar, en un transformador transformar energía, en una bomba es bombear, etc. La función primaria está vinculada a conceptos como velocidad, producción, calidad, servicio al cliente, características técnicas, entre otros.

- Las funciones auxiliares de apoyo logístico o secundarias son actividades que le ayudan al sistema a cumplir su función primaria, eventualmente el sistema o equipo puede funcionar sin ellas (aunque no es lo ideal), son aquellas otras funciones que el activo está en capacidad de cumplir de forma adicional, a la función primaria.

Ilustración 117 - Construcción literal de una función

Las Funciones se deben escribir en forma clara, única y concreta, de tal forma que se entiendan siempre igual.

[222] *Y a la vez es la función principal que el usuario o propietario del sistema espera que cumpla.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Constan de varios elementos			
Verbo	**Objeto o acción**	**Estándar**	**Condicionantes**
Reducir	**la velocidad de giro**	**a 90 RPM**	**con un moto-reductor de 5 HP, con un voltaje entre 110 y 125 voltios, con ruido inferior a 90 decibeles.**
La función debe ser alcanzable, medible y sostenible en el tiempo **Los condicionantes responden a preguntas como: ¿cuándo? ¿dónde? ¿porqué? ¿para qué? ¿cómo? ¿qué? etc.**			

Los estándares establecidos en la descripción de la función, son los que determinan si el equipo o máquina entra o no, en estado de falla; pueden ser de varios tipos:

- Múltiples, valores simultáneos como de un sistema eléctrico: voltios, amperaje, potencia, etc.
- Cuantitativos, como un valor de rango de presiones en *psi*[223]
- Cualitativos, es el caso de color azul o turbio, como también que el agua no presente oleaje
- Absoluto, el valor de una variable adquiere una temperatura absoluta de 1232° Rankine
- Variables, en función de los valores de atributos

La denominación de las funciones se realiza con números enteros.

Ilustración 118 - Funciones del sistema de bombeo

Función	Código	Descripción
Primaria	0	0. Recircular agua en un sistema de bombeo cerrado sin dejar elevar la corriente por encima de 3.5 amperios y manteniendo un caudal mínimo de 80 galones por minuto
Secundaria	1	1. Encender y apagar todo el sistema en el momento de accionar un interruptor
Secundaria	2	2. Permitir la conservación del fluido dentro del sistema
Secundaria	3	3. Parar todo el funcionamiento al oprimir un interruptor de emergencia
Secundaria	4	4. Mantener una potencia mínima de 0.5KW
Secundaria	5	5. Restringir total o parcial el flujo de agua dentro del sistema
Secundaria	6	6. Filtrar el agua
Secundaria	7	7. Evitar el reflujo
Secundaria	8	8. Mantener la temperatura de operación por debajo de 70ºC
Secundaria	9	9. Interrumpir el sistema cuando la temperatura alcanza 80ºC
Secundaria	10	10. Mantener un nivel bajo de vibraciones
Secundaria	11	11. Mantener un nivel bajo de ruido

(Mora, 2007b)

En seguida, se definen las fallas funcionales reales y potenciales para cada una de las funciones descritas (primaria y secundarias), se denotan con letras mayúsculas. La aplicación del procedimiento *FMECA* implica conocer de manera profunda, todas las circunstancias y eventos que conllevan a la falla de función principal o secundaria del sistema, tanto para casos reales como potenciales. Se deben conocer todas las causas inmediatas, básicas y raíces de las diferentes fallas funcionales, para esto es necesario aplicar los métodos de análisis de fallas y *RCFA* en forma previa, de tal manera que se llegue a determinar todas las causas de falla que hace que el sistema deje de operar y funcionar debidamente.

Las fallas como se explica anteriormente tienen varias clasificaciones, dependiendo del enfoque que se evalúe:

- Fallas internacionales OREDA: críticas, degradantes, incipientes y desconocidas (OREDA, 2002).

[223] *PSI - Pounds Square Inches - Libras por pulgada cuadrada - Medida de presión.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Fallas esporádicas y crónicas o recurrentes, desde la óptica de fallas.

Posteriormente, se describen los modos de falla, de cada una de las fallas funcionales para cada una de las funciones descritas, de aquí que el proceso toma la forma de un árbol lógico de fallas, pues en la medida que se avanza de nivel crece en la base. Se recomienda entre 3 y 15 fallas funcionales por cada función enunciada, en el evento en que se requieran más fallas funcionales se sugiere más bien especificar más la función y abrirla en dos; para los modos de falla igual que lo anterior se sugiere entre 3 y 15, como también en el caso de necesitar más modos de falla es preferible abrir la falla funcional en dos.

Los modos de falla son los que causan el estado de falla en el equipo o los que inciden indirectamente para que este evento ocurra. La definición de los modos de falla consiste en establecer todas las fallas factibles reales o potenciales, o similares en equipos idénticos o afines. Se deben listar todas las factibles, con el fin de que al llevar a cabo las operaciones de mantenimiento se eliminen o se controlen, mediante su reparación o mantenimiento. Los modos de fallas pueden ser físicos, de desgaste, humano, etc. Se debe trabajar estrictamente con causas raíces y no con síntomas o efectos, ni con causas básicas ni inmediatas ya que ellas no erradican el problema. Se presta más relevancia a la falla en sí y a su modo de falla que a los eventos o circunstancias anexas. La nomenclatura de los modos de fallas se hace con números enteros.

Los modos de falla se pueden clasificar en:

- Falla Completa - Se pierde totalmente la funcionalidad del sistema o equipo.
- Falla Parcial - El sistema opera adecuadamente, pero con posibles restricciones.
- Falla Intermitente - La falla se presenta en forma discontinua en el tiempo, lo ideal es que falle permanentemente para evaluar sus posibles causas raíces.
- Falla con el tiempo - Sucede en elementos con el uso, el abuso, el desgaste, etc.
- Sobre desempeño de la función - El equipo se utiliza inadecuadamente por encima (o por debajo) de sus capacidades.

Las consecuencias de las fallas se miden mediante la evaluación del impacto de ellas sobre: la organización, sus componentes, las máquinas o sus componentes; la función principal de mantenimiento es atenuar o eliminar estas consecuencias mediante la utilización de las herramientas básicas o avanzadas, con las operaciones, las tácticas y la estrategia integral de mantenimiento. Es probable que las consecuencias sean más importantes que las características técnicas de las fallas en sí mismas. Consiste en la descripción de lo que ocurre en cada modo de falla.

Las consecuencias a que se da lugar en la ocurrencia de fallas mediante su modo, al actuar bajo una determinada falla funcional en una función específica, pueden ser clasificadas según su efecto, así:

- Pérdida de vidas humanas.
- Pérdidas materiales mayores.
- Daños parciales o totales de equipos.
- Pérdidas de producción o servicios.
- Daños parciales o permanentes en el medio ambiente.

Según su categoría, se pueden organizar de la siguiente manera:

- Consecuencias de fallas ocultas. - Normalmente no inciden directamente pero pueden llegar a generar paradas serias y catastróficas. Generalmente están en los sistemas de protección sin seguridad inherente.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Consecuencias ambientales y seguridad física y humana. - Normas, leyes, contaminación, violación, seguridad, muertes, accidentes fatales, etc.
- Consecuencias Operacionales. - Pueden afectar calidad, seguridad, cantidad, atención al cliente, reproceso, desperdicios, etc. además de la reparación.
- Consecuencias No Operacionales. - Solo implican el costo de la reparación.

Una vez se establecen todas las funciones, sus fallas funcionales y sus correspondientes modos de fallas, se procede a calificar la severidad, la posibilidad de ocurrencia y la probabilidad de detección temprana de las fallas, con el fin de constituir el valor del *RPN*, con el cual se jerarquizan las tareas correctivas, modificativas y proactivas a realizar con el fin de erradicar o controlar las fallas.

Ecuación 65 - Cálculo del RPN

$$RPN = \text{Severidad x Posibilidad de Ocurrencia x Probabilidad de Detección} = S \ x \ O \ x \ D$$

El cálculo de la Severidad se realiza en dos partes, una de ellas asigna unos valores probabilísticos a cada criterio y en la segunda parte que se obtiene por análisis y discusión del GCF al utilizar las tablas internacionales de valores de los distintos criterios de severidad.

La calificación de la Severidad se realiza mediante el concurso de cinco criterios:

- FO - Fallas Ocultos
- SF - Impacto Seguridad Física
- MA - Impacto Medio Ambiente
- IC - Impacto en Imagen Corporativa
- OR - Costos de Reparaciones o Mantenimientos
- OC - Efectos en Clientes

Ecuación 66 - Estimación de la Severidad

$$\text{Severidad} = FO \, x \, K_{FO} + SF \, x \, K_{SF} + MA \, x \, K_{MA} + IC \, x \, K_{IC} + OR \, x \, K_{OR} + OC \, x \, K_{OC} = S \ ,$$

donde los coeficientes de los factores son constantes (su suma es de 1.0 o del 100%), así:

$$K_{FO} = 0.05 \ ó \ 5\% \ ; \ K_{SF} = 0.20 \ ó \ 20\% \ ; \ K_{MA} = 0.10 \ ó \ 10\% \ ;$$

$$K_{IC} = 0.30 \ ó \ 30\%; \ K_{OR} = 0.30 \ ó \ 30\% \ ; \ K_{OC} = 0.05 \ ó \ 5\%$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 119 - Fallas Funcionales y Modos de Fallas en Sistema de Bombeo

Función	Código	Descripción de la Función	Ítem Falla Funcional	Código de Falla Funcional	Descripción de la Falla Funcional	Ítem del Modo de Falla	Código del Modo de Falla	Descripción del Modo de Falla
Primaria	0	0. Recircular agua en un sistema de bombeo cerrado sin dejar elevar la corriente por encima de 3.5 amperios y manteniendo un caudal mínimo de 80 galones por minuto.	A	0 - A	*0A. El agua no circula*	1	0 - A - 1	0A1. La tubería está obstruida
						2	0 - A - 2	0A2. El motor está apagado
						3	0 - A - 3	0A3. No hay agua en el sistema
						4	0 - A - 4	0A4. La bomba está obstruida
						5	0 - A - 5	0A5. La granada está tapada
						6	0 - A - 6	0A6. La válvula principal está cerrada
						7	0 - A - 7	0A7. El nivel del tanque está por debajo de la succión
						8	0 - A - 8	0A8. La bomba está trabajando en vacío
			B	0 - B - 1	*0B. Se eleva la corriente por encima de 3.5 amperios*	1	0 - B - 1	0B1. El motor se dispara porque la bomba trabaja en vacío.
			C	0 - C	*0C. El caudal entregado por el sistema es menor de 80 gpm.*	1	0 - C - 1	0C1. La bomba ha perdido eficiencia
						2	0 - C - 2	0C2. La tubería está obstruida
						3	0 - C - 3	0C3. La válvula principal está muy cerrada
						4	0 - C - 4	0C4. El motor está pegado
						5	0 - C - 5	0C5. La bomba está pegada
						6	0 - C - 6	0C6. La granada está obstruida
			D	0 - D	*0D. El sistema se apaga*	1	0 - D - 1	0D1. Se está sobrecargando el motor
						2	0 - D - 2	0D2. Paro de emergencia defectuoso
Secundaria	1	1. Encender y apagar todo el sistema en el momento de accionar un interruptor.	A	1 - A	*1A. El sistema no se enciende al accionar el interruptor*	1	1 - A - 1	1A1. *Switch* de encendido defectuoso
						2	1 - A - 2	1A2. *Switch* de emergencia activado
			B	1 - B	*1B. El sistema no se apaga al accionar el interruptor*	1	1 - B - 1	1B1. *Switch* de encendido defectuoso
						2	1 - B - 2	1B2. *Switch* de emergencia activado
Secundaria	2	2. Permitir la conservación del fluido dentro del sistema	A	2 - A	*2A. El nivel del agua disminuye*	1	2 - A - 1	2A1. Filtración en el tanque
						2	2 - A - 2	2A2. Filtración en tubería o accesorios
						3	2 - A - 3	2A3. Evaporación excesiva
						4	2 - A - 4	2A4. Sello defectuoso
			B	2 - B	*2B. No hay agua en el sistema*	1	2 - B - 1	2B1. Filtración en el tanque
						2	2 - B - 2	2B2. Filtración en tubería o accesorios
Secundaria	3	3. Parar todo el funcionamiento al oprimir un interruptor de emergencia.	A	3 - A	*3A. El sistema sigue funcionando al oprimir el interruptor de emergencia.*	1	3 - A - 1	3A1. Interruptor de paro de emergencia defectuoso
Secundaria	4	4. Mantener una potencia mínima de 0.5KW	A	4 - A	*4A. La potencia está por debajo de 0.5KW*	1	4 - A - 1	4A1. El motor está defectuoso
Secundaria	5	5. Restringir total o parcial el flujo de agua dentro del sistema	A	5 - A	*5A. El agua fluye libremente, sin ninguna restricción*	1	5 - A - 1	5A1. La válvula principal no funciona correctamente
			B	5 - B	*5B. Se conserva flujo en el sistema después de restringirlo totalmente.*	1	5 - B - 1	5B1. La válvula principal está obstruida
Secundaria	6	6. Filtrar el agua	A	6 - A	*6A. El agua presenta suciedad y cuerpos extraños*	1	6 - A - 1	6A1. La granada no opera adecuadamente.
			B	6 - B	*6B. El sistema de filtrado está obstaculizado.*	1	6 - B - 1	6B1. El filtro (*strainer*) está sucio y no filtra bien.
Secundaria	7	7. Evitar el reflujo	A	7 - A	*7A. El fluido se devuelve.*	1	7 - A - 1	7A1. La granada está defectuosa
			B	7 - B	*7B. La válvula check está atorada.*	1	7 - B - 1	7B2. La válvula principal está defectuosa
Secundaria	8	8. Mantener la temperatura de operación por debajo d	A	8 - A	*8A. El sistema no se interrumpe cuando alcanza 80º centígrados de temperatura*	1	8 - A - 1	8A1. El termostato no opera en su límite fijado.
						2	8 - A - 2	8A2. El termóstato es inadecuado a la temperatura requerida.
			B	8 - B	*8B. El sistema se interrumpe a menos de 80ºC de temperaturas*	1	8 - B - 1	8B1. El termostato está malo
						2	8 - B - 2	8B2. Se está sobrecargando el motor
						3	8 - B - 3	8B3. Paro de emergencia defectuoso
Secundaria	9	9. Interrumpir el sistema cuando la temperatura alcanza 80ºC	A	9 - A	*9A. La temperatura de operación está por encima de 95ºC*	1	9 - A - 1	9A1. El sistema de ventilación está defectuoso
						2	9 - A - 2	9A2. El motor está atascado
						3	9 - A - 3	9A3. La bomba está pegada
Secundaria	10	10. Mantener un nivel bajo de vibraciones	A	10 - A	*10A. El equipo presenta altas vibraciones*	1	10 - A - 1	10A1. La bomba está trabajando en vacío
						2	10 - A - 2	10A2. Motor presenta desalineación con la bomba
						3	10 - A - 3	10A3. Rodamientos defectuosos
						4	10 - A - 4	10A4. Turbulencias excesivas dentro del sistema
						5	10 - A - 5	10A5. Aire en el sistema
						6	10 - A - 6	10A6. El eje del acople está flectado y torcido
						7	10 - A - 7	10A7. El sello está defectuoso
Secundaria	11	11. Mantener un nivel bajo de ruido	A	11 - A	*11A. El equipo tiene más de 95 decibeles.*	1	11 - A - 1	11A1. Rodamientos malos
						2	11 - A - 2	11A2. Aire en el sistema
						3	11 - A - 3	11A3. Turbulencias excesivas dentro del sistema
						4	11 - A - 4	11A4. Bomba pegada
						5	11 - A - 5	11A5. Sucios y cuerpos extraños dentro del sistema

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Los valores de los criterios de severidad se discuten entre los miembros, acorde al caso específico y a las circunstancias, mediante la obtención de los valores a partir de las siguientes opciones:

Ilustración 120 - Tablas de los valores de criterios de Severidad, de Ocurrencia y Detección

FO - Fallos Ocultos	
No existen fallas ocultas que puedan generar fallas múltiples posteriores - 0	0
Existe una baja posibilidad de que la falla NO sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores - 1	1
En condiciones normales la falla siempre será oculta y generará fallas múltiples posteriores - 2	2
Existe una baja posibilidad de que la falla SÍ sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores - 3	3
La falla siempre es oculta y ocasionará fallas múltiples graves en el sistema - 4	4

SF - Seguridad Física	
No afecta Personas ni equipos - 0	0
Afecta a una Persona y es posible que genere incapacidad de tipo temporal - 1	1
Afecta de dos a cinco Personas y puede generar incapacidad de tipo temporal - 2	2
Afecta a más de cinco Personas y puede generar incapacidad de tipo temporal o permanente - 3	3
Genera incapacidad permanente o la muerte, a una o más Personas - 4	4

MA - Medio Ambiente	
No afecta el medio ambiente - 0	0
Afecta el MA pero se puede controlar. No daña el Ecosistema. - 1	1
Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el Ecosistema. Es reversible en menos de seis meses con un valor inferior a 5.000 dólares. - 2	2
Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el Ecosistema. Es reversible en menos de tres años con un valor inferior a 50.000 dólares. - 3	3
Afecta los recursos sociales y el Ecosistema. Es reversible en más de tres años o es irreversible. Su impacto social y ecológico es superior a los 50.000 dólares. - 4	4

IC - Imagen Corporativa	
No es relevante - 0	0
Afecta credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos - 1	1
Afecta credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión inferior a 1.000 dólares - 2	2
Afecta credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión entre 1.000 y 10.000 dólares - 3	3
Afecta credibilidad de clientes pero se maneja con argumentos e inversión mayor a 10.000 dólares. Puede ser irreversible. - 4	4

OR - Costos de Reparación	
Entre 1 y 50 dólares - 0	0
Entre 51 y 500 dólares - 1	1
Entre 501 y 5.000 dólares - 2	2
Entre 5.001 y 50.000 dólares - 3	3
Mayor a 50.001 dólares - 4	4

OC - Efectos en Clientes	
Entre 1 y 50 dólares - 0	0
Entre 51 y 500 dólares - 1	1
Entre 501 y 5.000 dólares - 2	2
Entre 5.001 y 50.000 dólares - 3	3
Mayor a 50.001 dólares - 4	4

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ocurrencia	
Frecuente - 1 falla en 1 mes - 4	4
Ocasional - 1 falla en 1 año - 3	3
Remota - 1 falla en 5 años - 2	2
Poco probable - 1 falla en 20 años - 1	1

Detección	
Nula - No se puede detectar una causa potencial / mecanismo y modo de fallo subsecuente - 4	4
Baja - Baja probabilidad para detectar causas potenciales/mecanismos y modos de fallos subsecuentes - 3	3
Media - Mediana probabilidad para detectar causas potenciales / mecanismos y modos de fallos subsecuentes - 2	2
Seguro - Siempre se detectarán causas potenciales / mecanismos y modos de fallos subsecuentes - 1	1

Los valores de Posibilidad de Ocurrencia y probabilidad de Detección, se logran por análisis del GCF acorde a las circunstancias propias de la falla y equipo en cuestión; y se determinan a partir de las tablas descritas en la ilustración anterior.

El proceso continúa con la evaluación en equipo del GCF sobre cada uno de los modos de fallas descrito, una vez se cuenta con la evaluación se procede a su clasificación y jerarquización para determinar la prioridad de ejecución de las tareas correctivas, modificativas o proactivas de mantenimiento.

Luego se planifica la logística de ejecución, mediante la asignación de recursos físicos y humanos requeridos para la realización, se definen los responsables de la puesta en marcha de las tareas y las fechas de actuación, se determinan qué tareas se pueden llevar a cabo en forma simultánea, las predecesoras y las posteriores en cada una de ellas, de tal forma que se reduzcan costos y tiempos de todas las tareas a realizar.

Una vez se han ejecutado todas las actividades planeadas o no derivadas del procedimiento *FMECA*, se realiza nuevamente la evaluación del *RPN*, mediante la valoración vigente (después de realizadas las tareas acordadas) de los parámetros de Severidad, Ocurrencia y Detección, se establece en forma reiterativa la jerarquización, la asignación de recursos, la logística y así sucesivamente, hasta algún momento en que se tenga control absoluto de las fallas o se hayan controlado de forma significativa.

5.6.2.3 Valoración cualitativa del Riesgo

En ocasiones es importante graficar el riesgo de cada una de los modos de falla descritos, su aplicación tiene dos dimensiones: en el procedimiento *FMECA* se habla de un volumen de riesgo ya que enfrenta tres variables en un plano volumétrico de tres ejes: severidad, ocurrencia y detección. Esto se puede realizar con la ayuda de Excel Procedimiento *FMECA* adjunta en el CD, en ella se puede enfrentar S y D, S y O, D y O con el fin de observar su comportamiento según la criticidad de la falla.

En el caso particular del *RCM*, donde solo se trabaja con severidad y ocurrencia, se gráfica como un mapa de riesgo de *RPN*, donde se ubican en una matriz cada una de las tareas a realizar, para jerarquizarlas y clasificarlas según sus efectos y consecuencias.

El riesgo se modela mediante una matriz en donde se exponen en el eje de las ordenadas las probabilidades de falla de cada uno de los equipos (de sus respectivas funciones, fallas funcionales y modos de falla), mientras que en el eje de las abscisas se encuentra la severidad de las consecuencias de la falla funcional en su modo específico de falla. El objetivo final es determinar los niveles de riesgo.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 121 - Calificación RPN, tareas y logística de realización en procedimiento FMECA

Código del Modo de Falla	Descripción del Modo de Falla	Calificación S						RPN				Jerarquía de ejecución de tareas		Tipo de tarea a realizar				Recursos a utilizar		Lógica de las Tareas		Control		Nuevas calificaciones de Modos de Fallas después de ejecutadas todas las tareas						nuevo RPN				
		FO	SF	SIA	IC	OR	DC	S	O	D	Valor RPN			Correctiva	Modificativa	Preventiva	Predictiva	Humanos	Físicos	Tareas predecesoras	Tareas generadas dependientes	Personas responsables de la tarea	Fechas de realización de las tareas	FO	SF	SIA	IC	OR	DC	S	O	D		Valor RPN
0-A-1	0A1. La tubería está obstruida	3	0	0	0	1	0	0.480	1	1	0.48	3	1	X			X																	
0-A-2	0A2. El motor está apagado	0	0	0	0	2	0	0.600	4	1	2.4	25	25	X																				
0-A-3	0A3. No hay agua en el sistema	3	1	0	0	0	3	0.800	2	2	3	28	28		X	X																		
0-A-4	0A4. La bomba está obstruida	2	0	0	0	0	1	0.150	1	2	0.3	1	1			X																		
0-A-5	0A5. La granada está tapada	2	0	0	0	0	1	0.180	4	2	1.8	19	19			X																		
0-A-6	0A6. La válvula principal está cerrada	2	0	0	0	0	2	0.200	1	4	0.8	4	4	X	X																			
0-A-7	0A7. El nivel del tanque está por debajo de la succión	2	0	0	0	2	0	0.700	1	3	2.1	20	20		X																			
0-A-8	0A8. La bomba está trabajando en vacío	1	0	0	0	2	0	0.650	2	2	2.60	48	48		X																			
0-B-1	0B1. El motor se dispara porque la bomba trabaja en vacío.	1	0	0	0	2	0	0.650	4	2	5.2	43	43	X																				
0-C-1	0C1. La bomba ha perdido eficiencia	1	0	0	0	2	0	0.650	2	4	5.2	44	44			X																		
0-C-2	0C2. La tubería está obstruida	3	0	0	0	1	0	0.450	1	3	1.35	5	5		X																			
0-C-3	0C3. La válvula principal está muy cerrada	2	0	0	0	0	0	0.100	1	3	0.3	2	2			X																		
0-C-4	0C4. El motor está pegado	1	0	0	0	2	0	0.650	2	1	1.3	7	7				X																	
0-C-5	0C5. La bomba está pegada	2	0	0	0	2	0	0.700	2	1	1.4	8	8	X	X	X																		
0-C-6	0C6. La granada está obstruida	3	0	0	0	1	0	0.450	4	3	5.4	45	45			X																		
0-D-1	0D1. No está sobrecargando el motor	2	0	0	0	2	0	0.700	2	3	4.2	33	33		X	X																		
0-D-2	0D2. Paro de emergencia defectuoso	4	0	0	0	2	0	0.800	1	1	0.8	9	9	X																				
1-A-1	1A1. Switch de encendido defectuoso	2	0	0	0	2	0	0.700	2	1	1.4	10	10				X																	
1-A-2	1A2. Switch de emergencia activado	3	3	0	0	2	0	1.380	3	3	12.18	55	55				X																	
1-B-1	1B1. Switch de encendido defectuoso	4	0	0	0	2	0	0.800	1	2	1.6	16	16				X																	
1-B-2	1B2. Switch de emergencia activado	2	0	0	0	1	0	0.300	1	2	1.2	11	11				X																	
2-A-1	2A1. Filtración en el tanque	2	0	0	0	2	0	1.000	1	4	4.0	34	34	X		X																		
2-A-2	2A2. Filtración en tubería o accesorios	1	0	0	0	2	0	0.600	2	2	2.40	49	49	X		X																		
2-A-3	2A3. Empaquetadura excesiva	1	0	0	0	1	0	0.350	1	4	1.4	12	12			X																		
2-A-4	2A4. Sello defectuoso	1	0	0	0	2	0	0.650	2	2	2.6	21	21			X																		
2-B-1	2B1. Filtración en el tanque	3	0	0	0	2	0	1.050	1	4	4.2	35	35				X																	
2-B-2	2B2. Filtración en tubería o accesorios	1	0	0	0	2	0	0.650	2	2	2.60	50	50				X																	
3-A-1	3A1. Interruptor de paro de emergencia defectuoso	4	0	0	0	2	0	0.800	1	2	1.6	17	17			X																		
4-A-1	4A1. El motor está defectuoso	2	0	0	0	2	0	0.700	3	1	2.1	21	21		X		X																	
5-A-1	5A1. La válvula principal no funciona correctamente	3	0	0	0	2	0	0.750	1	3	2.25	23	23			X																		
5-B-1	5B1. La válvula principal está obstruida	3	0	0	0	1	0	0.750	1	2	1.5	14	14	X		X																		
6-A-1	6A1. La granada no opera adecuadamente.	3	0	0	0	1	0	0.450	3	4	5.4	46	46			X																		
6-B-1	6B1. El filtro (strainer) está sucio y no filtra bien.	2	0	0	0	2	0	0.700	2	4	5.6	53	53			X																		
7-A-1	7A1. La granada está defectuosa	2	0	0	0	1	0	0.400	2	4	3.2	47	47				X																	
7-B-1	7B1. La válvula principal está defectuosa	3	0	0	0	2	0	0.750	1	3	2.25	24	24				X																	
8-A-1	8A1. El termostato no opera en su límite fijado.	4	0	0	0	2	0	1.100	1	2	2.2	22	22			X																		
8-A-2	8A2. El termostato es inadecuado a la temperatura requerida.	4	0	0	0	2	0	0.800	1	4	3.2	29	29		X																			
8-B-1	8B1. El termostato está malo	4	0	0	0	2	0	1.100	2	2	4.4	37	37	X		X																		
8-B-2	8B2. Se está sobrecargando el motor	2	0	0	0	2	0	0.700	3	3	4.2	36	36	X		X																		
8-B-3	8B3. Paro de emergencia defectuoso	4	0	0	0	2	0	0.800	1	2	1.6	18	18		X	X																		
9-A-1	9A1. El sistema de ventilación está defectuoso	2	0	0	0	2	0	0.750	2	3	4.5	38	38		X	X																		
9-A-2	9A2. El motor está atascado	2	0	0	0	2	0	0.700	2	1	1.4	13	13	X		X																		
9-A-3	9A3. La bomba está pegada	3	0	0	0	1	0	0.450	2	1	0.9	6	6	X		X																		
10-A-1	10A1. La bomba está trabajando en vacío	3	0	0	0	1	0	0.450	3	2	2.7	26	26		X																			
10-A-2	10A2. Motor presenta desalineación con la bomba	2	0	0	0	2	0	0.700	3	4	8.4	54	54	X			X																	
10-A-3	10A3. Rodamientos defectuosos	2	0	0	0	2	0	0.700	3	3	6.3	51	51			X	X																	
10-A-4	10A4. Turbulencias excesivas dentro del sistema	2	0	0	0	1	0	0.400	3	3	3.6	39	39			X																		
10-A-5	10A5. Aire en el sistema	2	0	0	0	1	0	0.400	3	4	4.8	40	40	X		X																		
10-A-6	10A6. El eje del acople está flectado y torcido	2	0	0	0	2	0	0.700	1	4	2.8	27	27	X		X																		
10-A-7	10A7. El sello está defectuoso	1	0	0	0	2	0	0.650	3	2	3.9	32	32	X		X																		
11-A-1	11A1. Rodamientos malos	2	0	0	0	2	0	0.700	3	3	6.3	52	52	X		X																		
11-A-2	11A2. Aire en el sistema	2	0	0	0	1	0	0.400	3	4	4.8	41	41		X																			
11-A-3	11A3. Turbulencias excesivas dentro del sistema	2	0	0	0	1	0	0.400	3	4	4.8	42	42			X																		
11-A-4	11A4. Bomba pegada	3	0	0	0	2	0	0.750	2	1	1.5	15	15	X		X																		
11-A-5	11A5. Sucios y cuerpos extraños dentro del sistema	2	0	0	0	1	0	0.400	3	3	3.6	30	30	X		X																		

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Para determinar la matriz modeladora del riesgo se establecen rangos de escalas de frecuencia y una clasificación de la severidad de las consecuencias, tal y como se muestra:

Ilustración 122 - Escala de Frecuencia - Riesgo - RPN

Escala	Tipo de Evento	Probabilidad
1	Extremadamente improbable	1.10^{-6}
2	Improbable	2.10^{-5}
3	Algo Probable	4.10^{-4}
4	Probable	8.10^{-3}
5	Muy Probable	2.10^{-1}

Ilustración 123 - Clasificación de la Severidad de las Consecuencias

Nivel	Severidad de las Consecuencias
A	No severas
B	Poco Severas
C	Medianamente Severas
D	Severas
E	Muy Severas

Ilustración 124 - Matriz Modeladora del Riesgo. Relación Probabilidad / Consecuencia

MATRIZ DE CRITICIDAD		CONSECUENCIA				
		A	B	C	D	E
PROBABILIDAD	5	Medio	Alto	Alto	Muy alto	Muy alto
	4	Medio	Medio	Alto	Alto	Muy alto
	3	Bajo	Medio	Medio	Alto	Muy alto
	2	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto
	1	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio	Alto

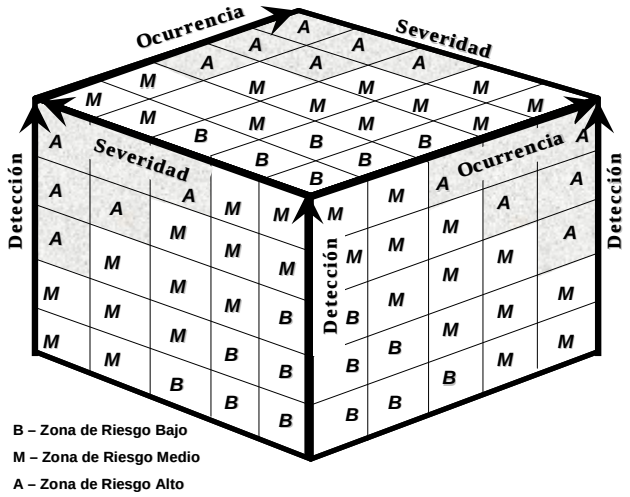
Una vez se establece la matriz de prioridad, se da curso a las acciones correctivas y tareas proactivas con mayor nivel de criticidad, en su orden jerárquico.

Los mapas y volúmenes de riesgo, son útiles cuando se desea:

- Aplicar sistemas de inspección basada en riesgos
- Revisar frecuencias de inspección de riesgos
- Optimizar los costos asociados a los riesgos
- Cuantificar y mejorar los niveles de riesgos
- Mejorar la productividad y el rendimiento

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 125 - Volumen de riesgo en el procedimiento FMECA



(Mora, 2007a)

Para el apoyo del procedimiento *FMECA* se puede utilizar el formato de los dos programas del CD, anexos, denominados 10 y 11, alusivos a *FMECA*.

Programa de CD 10 - Organizador Excel FMECA

Programa de CD 11 - Relación de Severidad Ocurrencia Detección FMECA

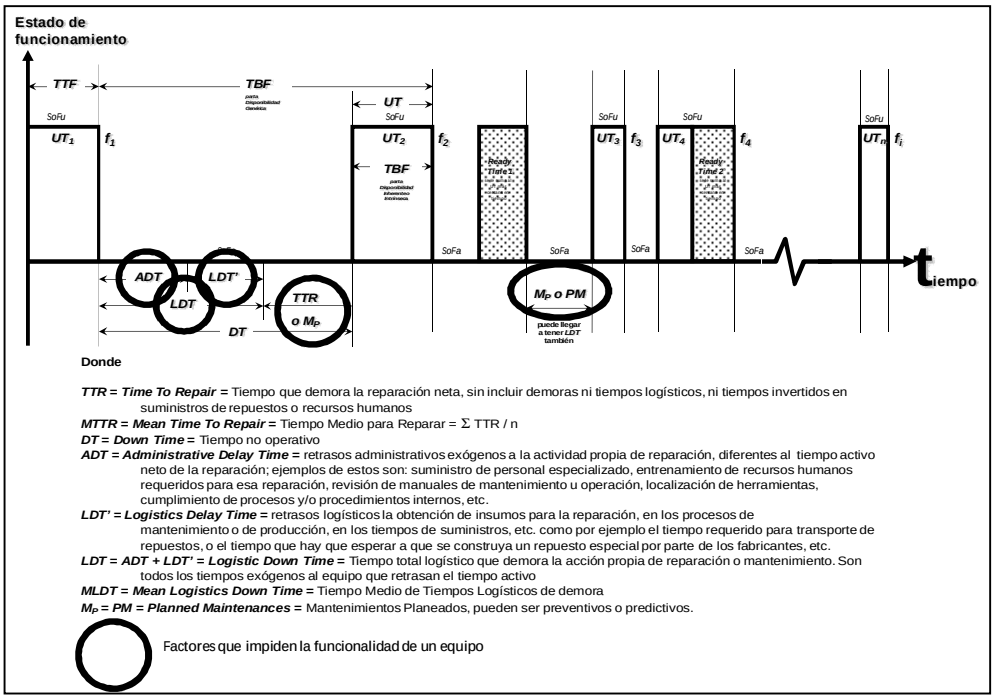
5.6.3 Gestión y manejo de inventarios, repuestos e insumos de mantenimiento

La utilización de un sistema o metodología que permita administrar y controlar el manejo de los insumos, los repuestos y las materias primas de mantenimiento se considera como un instrumento avanzado de mantenimiento ya que mediante su aplicación se logran sustanciales ahorros en la gestión y operación del mantenimiento industrial, como también se logran mejoras logísticas en el servicio de mantenimiento.

Es importante recordar de la Ilustración 30 - Tiempos importantes, siglas y demás convenciones que se usan en la medición y predicción CMD -, que los hechos que generan la no funcionalidad y la no disponibilidad de los equipos, pueden ser tres:

- Tareas proactivas (mantenimientos planeados).
- Reparaciones (mantenimientos no planeados: correctivos o modificativos).
- Retrasos en el suministro de repuestos, insumos, materias primas de mantenimiento o recursos humanos.

Ilustración 126 - Factores que generan no funcionalidad o no disponibilidad en los equipos



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

De allí la gran importancia de presentar, al menos los criterios básicos y las estrategias de manejo de los inventarios, insumos, materias primas o repuestos de mantenimiento.

La existencia de almacenes de repuestos o de inventarios, se justifica desde dos hechos posibles:

- El consumo de repuestos es más alto que la velocidad de producción o de fabricación de los mismos, es decir la demanda es más alta que la oferta.

- El tiempo de transporte y/o la distancia entre el punto de fabricación o comercialización de repuestos y el punto donde se consumen o donde se requieren para ser usados, son muy grandes.

Los inventarios son almacenamientos de materias primas, repuestos, insumos, productos en proceso o bienes terminados que aparecen a lo largo de la cadena productiva o del proceso logístico de una empresa. En general el costo de mantener los inventarios puede alcanzar cifras significativas cercanas hasta del 40% de su valor y representa casi un 15% de la venta total anual de las empresas. De allí la gran importancia de presentar, al menos los criterios básicos y las estrategias fundamentales de manejo de los inventarios, insumos, materias primas, repuestos, productos terminados o en proceso.

5.6.3.1 Clasificación ABC

El primer paso en el manejo de los inventarios es clasificar los repuestos acorde al grado de importancia de los mismos, esto se realiza mediante una clasificación ABC, derivada del principio de Wilfredo Pareto, un renacentista del siglo XIX, quien documenta por primera vez el principio de la administración de materiales, el cual es la base del análisis ABC y cuyo principio manifiesta que pocos factores son la causa de muchos de los efectos (Bierman, y otros, 1991).

El principio ABC jerarquiza los repuestos o insumos, acorde a la cantidad de unidades usadas y al precio de las mismas, el concepto del monto económico que representa el consumo durante un período de tiempo, es el concepto más importante para definir la categoría de los repuestos e insumos.

Se parte de la base de que el esfuerzo logístico que se le debe prestar a una cantidad pequeña de referencias que mueven un gran volumen y un buen porcentaje de los artículos de los inventarios, debe ser alto, para ello es posible establecer algunas relaciones, entre las relevantes existen dos que son las más usadas:

- Árbones recomienda que un 10% de los artículos mueve un 75% de la cantidad utilizada o vendida; el 35% de las referencias representan el 95% de la demanda y el 55% de los productos solo mueve el 5% de la cantidad total de lo almacenado (Árbones, 1999).

- Ronald Ballou expresa que un 20% de las referencias representa al menos el 80% de la cifra utilizada en total de ítem (Ballou, 2004).

El proceso de clasificación ABC se realiza de la siguiente manera: inicialmente se tabulan los datos reales, luego se ordenan de mayor a menor en Y (es el porcentaje acumulado de la cantidad monetaria usada en promedio anual en los últimos 18 meses), se calcula X que es la contribución en porcentaje de referencia acumulado (por ejemplo si son 10 referencias, el artículo 1 contribuye con una X de 1/10 igual 0.1, la referencia 5 con una X del 50%, y así sucesivamente), en seguida se calcula el A (apoyo logístico) con las fórmulas que se dan a continuación, con el A promedio real actual se define una nueva combinación 10&75 ó 20&80, con lo cual estima nuevamente la Y con X y A conocidas, y de esta forma se clasifican todas las referencias en las tres categorías A B C.

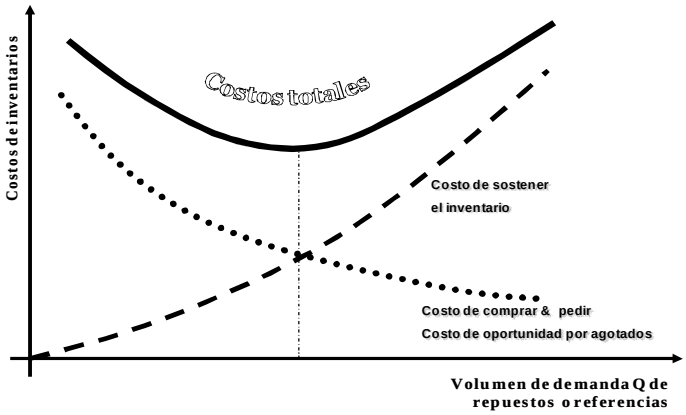
En inventarios se procura bajar costos y elevar el nivel de servicio al cliente.
En el primer aspecto de costos hay elementos fundamentales, que permiten establecer importantes criterios de manejo de los inventarios.

5.6.3.2 Costos

Los principales rubros asociados a los inventarios y a su óptica desde pronósticos, son: de pedir, de sostener el inventario y el costo de oportunidad por agotados en las referencias.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 127 - Costos de inventarios



(Mora, 2007c)

5.6.3.2.1 Costos de pedir al proveedor o fabricar

Esta cifra se asocia al mismo hecho de solicitar al proveedor o al fabricante una cantidad definida de referencias, para ser entregadas en un determinado tiempo con unas especificaciones técnicas y de calidad dadas, esto conlleva costos como: procesamiento del pedido, comunicaciones, elaboración de la documentación pertinente, el tiempo de los funcionarios que intervienen, el costo en sí de la producción o de las referencias, transacciones bancarias y financieras, transporte (cuando estos no se incluyen en otro concepto), recursos de los diferentes departamentos internos o externos que facultan la compra y demás coligados. Este rubro normalmente es constante para distintas referencias, puede variar un poco entre categorías, normalmente no están directamente relacionados con el volumen de la compra o pedido.

5.6.3.2.2 Costos de sostener

El mantenimiento en sí del inventario, conlleva una serie de costos asociados como: renta o alquiler del espacio físico volumétrico que se ocupa y vacío asignado al almacén o bodega, costo financiero del valor total de la mercancía almacenada en promedio (este es de los rubros más altos que se tienen en cuenta en los costos totales), costos de seguros e impuestos relacionados con el valor y volumen del inventario que se maneja (incluye seguros, riesgos, robos, incendios, terremotos, etc.) y costo por obsolescencia que es el que generan los productos que por alguna razón de tiempo u otra, se deterioran, o dejan ser utilizados por diversas razones.

5.6.3.2.3 Costos de agotar

Normalmente la falta de materias primas o productos, cuando estos se demandan y por consecuencia no se pueden entregar a quien los solicita, conlleva a varios costos extras, como son: costo de incumplimiento a los clientes, trabajos de mantenimiento paralizados, por la existencia de referencias agotadas, con toda la problemática que ello genera en los clientes, con los impactos negativos que esto causa en el demandante (que a veces es difícil de medir, se toma como un costo de oportunidad de no poder satisfacer al cliente) y el costo de pedidos extras o pendientes, el cual consiste en desarrollar todo un canal logístico paralelo para administrar este tipo de demandas extras (por agotados) por fuera del sistema tradicional, o cuando se pagan cifras adicionales por transporte o por producción para poder atender las solicitudes de pedidos insatisfechos a productores o proveedores. Habitualmente son difíciles de calcular, por lo general se asumen como costos de oportunidad.

5.6.3.3 Nivel de servicio

El segundo gran objetivo de los inventarios es mantener una disponibilidad suficiente de referencias y volúmenes, que logren satisfacer la demanda que se requiere periódicamente; se calcula a partir de las probabilidades de disponibilidad de cada una de las referencias posibles que en forma habitual pide el cliente, también se dan casos de varias referencias en un solo pedido o el caso más complejo es cuando pueden ocurrir varias demandas de diferentes referencias en distintos pedidos en el tiempo, para el mismo cliente.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ejemplo 34 - Estimación del nivel de servicio al cliente

Se tiene un cliente que demanda varios ítems diferentes, en las siguientes tablas se aportan los datos de la tasa de aprovisionamiento de cada referencia y la frecuencia con que estas se solicitan en forma habitual, para los distintos casos.

$$Nivel\ de\ Servicio\ =\ 100\%\ -\ \frac{Cantidad\ no\ entregada\ \ por\ \ período}{Demanda\ \ total\ \ del\ \ período}$$

En el evento de una sola referencia como la HJ-675, se estima así:

Nivel de servicio para un artículo		Cantidad		Faltante agotado
Demanda No.	Fecha	Demanda	Entregada	
1	Año 1 - Mes 1 - Día 12	76	76	0
2	Año 1 - Mes 1 - Día 18	67	66	1
3	Año 1 - Mes 1 - Día 25	84	83	1
4	Año 1 - Mes 2 - Día 09	74	34	40
5	Año 1 - Mes 3 - Día 06	18	18	0
6	Año 1 - Mes 3 - Día 10	42	42	0
7	Año 1 - Mes 5 - Día 3	40	34	6
8	Año 1 - Mes 5 - Día 24	7	7	0
9	Año 1 - Mes 7 - Día 12	23	17	6
10	Año 1 - Mes 8 - Día 11	70	68	2
11	Año 1 - Mes 8 - Día 19	64	64	0
12	Año 1 - Mes 8 - Día 30	26	26	0
13	Año 1 - Mes 9 - Día 26	56	56	0
14	Año 1 - Mes 10 - Día 17	18	18	0
15	Año 1 - Mes 11 - Día 02	90	89	1
16	Año 1 - Mes 11 - Día 14	4	4	0
17	Año 1 - Mes 12 - Día 06	44	23	21
	Demanda total	803	Suma agotados	78
Las cantidades agotadas no entregadas, no se envían en el siguiente pedido				

$$Nivel\ de\ \ servicio\ por\ \ período_{\ HJ-675}\ =\ 100\,\%\ -\ \frac{78}{803} = 100\% - 9.71\% \ =\ 90.29\%$$

Cuando se trata de varias referencias individuales no combinadas, se estima cada una de ellas en forma independiente y el global del nivel de servicio se calcula, mediante la multiplicación probabilística del grado de disponibilidad de cada una.

Ítem	Referencias	Probabilidad de surtido de pedido integral
1	JK-989	93.67%
2	HJ-675	92.37%
3	LM-034	89.98%
4	GH-208	87.76%

$$Nivel\ de\ \ servicio\ \ global_{\ JK-898\ \&\ HJ-675\ \&\ LM-034\ \&\ GH-208}\ =\ 93.67\%\ *\ 92.37\%\ *\ 89.98\%\ *\ 87.76\% = 68.32\%$$

El total es menor que el individual de cada ítem

Cuando hay varias referencias y se pueden generar demandas, con diferentes opciones de combinación, se cuantifica así:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ítem	Referencias	Frecuencia de demanda	Probabilidad de surtido de pedido integral	Cálculo global
1	JK-989	0.08	93.67%	0.07494
2	HJ-675	0.09	92.37%	0.08313
3	LM-034	0.11	89.98%	0.09898
4	GH-208	0.09	87.76%	0.07898
1 y 2	JK-989 y HJ-675	0.09	86.52%	0.07787
1 y 3	JK-989 y LM-034	0.07	84.28%	0.05900
1 y 4	JK-989 y GH-208	0.10	82.20%	0.08220
2 y 3	HJ-675 y LM-034	0.09	83.11%	0.07480
2 y 4	HJ-675 y GH-208	0.04	81.06%	0.03243
3 y 4	LM-034 y GH-208	0.07	78.97%	0.05528
1, 2 y 3	JK-989, HJ-675 y LM-034	0.06	77.85%	0.04671
1, 2 y 4	JK-989, HJ-675 y GH-208	0.03	75.93%	0.02278
2, 3 y 4	HJ-675, LM-034 y GH-208	0.05	72.94%	0.03647
1, 2, 3 y 4	JK-989, HJ-675, LM-034 y GH-209	0.03	68.32%	0.02050
	Suma	1.00	Tasa promedio de atención integral	84.41%

(Mora, 2007c)

En resumen se puede afirmar que el costo del inventario a mantener, está en función de varias cosas, entre ellas, descuellan: el nivel del servicio que se desea sostener a un cliente en determinadas referencias (ya que este define la cantidad a despachar o sea los volúmenes a mantener), los volúmenes a mantener (pues esto depende de las cifras que se pidan y el tiempo en que se requieran, lo cual coaligado da el monto de unidades de cada referencia a mantener y por ende influye sobre el costo), los tiempos de reaprovisionamiento (en la medida que sean más frecuentes o no, incide en los volúmenes que se almacenan y que se tienen disponibles). Por esto se procede ahora a profundizar un poco en la forma en se calculan las cantidades a pedir en cada una de las dos filosofías de manejo de inventarios: *Demand Pull* o *Technology Push*.

Ilustración 128 - Datos reales - Inventarios - Clasificación A B C

Ítem	Referencia	Consumo de unidades por mes																		Demanda o Cantidad usada promedio en los últimos 18 meses	Precio de Referencia Unitario	Cantidad monetaria promedio demanda anual
		ene-04	feb-04	mar-04	abr-04	may-04	jun-04	jul-04	ago-04	sep-04	oct-04	nov-04	dic-04	ene-05	feb-05	mar-05	abr-05	may-05	jun-05			
1	D-232	148	60	103	277	252	366	279	60	267	107	2	220	334	120	386	124	193	106	189	49078	$ 6,187,463.41
2	H-876	68	304	46	288	186	144	88	180	391	323	56	76	267	268	256	34	219	274	193	21728	$ 2,790,840.89
3	U-897	326	54	353	196	217	0	78	27	331	104	68	20	347	82	146	368	380	137	180	15449	$ 1,850,446.89
4	J-321	396	322	323	258	381	8	253	265	243	275	128	317	62	272	180	339	352	368	263	22633	$ 3,975,025.41
5	Y-098	379	289	284	389	90	274	296	379	244	270	23	313	270	58	205	297	122	2	232	85485	$ 13,247,008.89
6	M-087	128	41	302	208	211	131	86	257	120	17	350	308	267	18	117	57	308	181	173	9410	$ 1,082,847.04
7	Z-232	6	84	243	339	241	146	329	82	319	165	128	327	285	301	322	381	162	241	228	81128	$ 12,322,441.78
8	I-209	338	190	286	354	155	99	107	136	394	4	125	332	7	146	336	87	279	56	191	37335	$ 4,744,310.56
9	K-982	144	176	151	60	187	12	351	388	338	349	77	262	47	319	364	10	103	151	194	45226	$ 5,844,204.22
10	O-786	9	6	6	5	4	0	3	0	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2	35336	$ 48,423.41
11	D-343	263	231	50	296	141	133	239	322	86	152	4	161	376	368	377	301	1	232	207	83645	$ 11,564,695.74
12	D-321	2	341	332	385	332	0	263	311	5	298	259	7	126	1	320	1	3	20	167	94912	$ 10,566,869.33
13	L-786	76	237	347	251	2	357	83	314	388	173	144	167	222	58	255	0	196	121	188	41613	$ 5,226,284.56
14	M-789	242	49	364	337	14	327	124	301	356	39	355	301	240	256	379	307	288	364	258	89143	$ 15,329,294.41
15	w-023	213	32	33	328	256	291	77	182	350	294	135	350	275	298	249	113	201	366	225	43587	$ 6,526,749.67
16	G-230	0	3	6	2	3	0	2	1	2	0	5	2	3	7	4	5	4	0	3	45041	$ 81,741.07
17	A-219	224	6	144	343	28	161	358	343	192	276	110	339	319	262	284	360	284	64	228	18490	$ 2,805,686.30
18	G-564	150	2	211	260	386	230	144	302	128	52	308	220	118	124	150	322	25	129	181	99310	$ 11,994,441.11
19	K-920	207	123	374	274	302	246	16	122	112	25	103	364	325	79	369	113	273	223	203	66904	$ 9,044,429.63
20	J-629	74	296	4	372	257	7	168	271	289	32	312	257	192	299	246	161	369	100	206	93070	$ 12,774,719.26
21	M-063	167	334	250	89	4	376	263	287	103	293	153	379	382	265	376	204	300	370	255	79324	$ 13,499,769.63
22	S-785	1	0	0	0	0	1	1	0	2	0	0	0	12	0	0	0	0	0	1	78075	$ 49,158.33
23	N-672	188	158	225	5	329	338	243	292	245	293	356	226	394	359	88	58	76	75	219	77491	$ 11,330,906.22
24	F-320	152	147	214	253	259	87	366	259	290	145	236	322	63	387	132	146	263	161	216	38790	$ 5,577,140.00

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ecuación 67 - Fórmulas de A, Y y X para Clasificación A B C de Inventarios

$$\text{Apoyo Log\acute{\i}stico} = A = \frac{X*(1-Y)}{(Y-X)}$$, con Y porcentaje acumulado de la cantidad monetaria anual y X como el porcentaje acumulado de artículos, si se despejan Y y X, quedan así:

$$Y = \frac{X*(1+A)}{(A+X)} \text{ y a su vez } X = \frac{A*(Y-1)}{(1-Y)}$$

Para el caso particular se adopta un ABC con la proporción Árbones X & Y de 10 & 75, lo que da lugar a la categorización de las referencias de tal forma que el 10 % de los ítem son A y representan el 75% de la cantidad monetaria que se demanda anualmente, el 25% de los artículos caen en la categoría B y el resto del 55% se establecen como productos tipo C.

La estrategia que se desarrolla con las referencias en función de su clasificación, es:

- Tipo A, se mantiene un excelente nivel de inventarios en todos los almacenes o en los que existan.
- Tipo B, son referencias que se mantienen niveles medios de inventarios solo en algunos almacenes.
- Tipo C, son artículos a los cuales no se les mantiene buenos márgenes de inventarios, y en caso de hacerlo sólo se tienen en uno que otro almacén de repuestos (si hay varios), cuando solo hay uno se pide cuando se requiere.

De alguna manera la clasificación ABC representa el grado de esfuerzo que se da al inventario de la referencia (A es el más alto y C el más bajo). En la siguiente ilustración alusiva al tema, se observa que el 10% de las referencias representan el 75% de la demanda total en unidades económicas, el 35% de los artículos corresponde aproximadamente al 94% de las referencias requeridas, lo cual es bastante similar a la propuesta Árbones 10 & 75.

Para estimar el nivel medio del inventario promedio a mantener de la referencia, se define primero mediante políticas de la empresa el inventario promedio a mantener o la tasa de rotación (que denota el tiempo promedio que se mantiene un repuesto o insumo dentro del estante del inventario).

Para inventarios promedio se recomienda 1.25 veces el consumo promedio[224] mes para los tipo A 0.75, para los B y 0.35 o menos para los tipo C. La tasa de rotación es el inverso por año del inventario promedio, en el siguiente ejemplo al dividir 12 meses entre el número de inventarios promedio se obtiene una rotación de 9.6 veces para las referencias tipo A, 16 para B y 34 veces por año para los artículos tipo C.

En el evento de que se deseen retirar referencias por no rotación o porque no tienen demanda, el procedimiento de cálculo es el mismo, con el nuevo X y el A definido por política se estima el nuevo Y, para realizar en forma posterior los cálculos pertinentes ya expuestos.

En el ejemplo que se muestra a continuación se descartan del inventario regular las nueve (9) referencias sombreadas con trama de puntos: L-099, L-090, G-239, J-321, M-063, L-786, D-395, K-982 y K-920 por baja rotación; se desea estimar el inventario a mantener por cada ítem.

[224] *Para el consumo promedio sea actualizado, se utiliza el cálculo de este valor mediante una media aritmética entre el consumo del último mes y el pronóstico (estimado con métodos de series temporales o mediante otra metodología seria, científica y acertada de cálculo) de demanda del próximo período o mes.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 129 - Clasificación ABC Inventarios

1	2	21	22	23		24	25	26	27
Ítem	Referencia	Demanda o Cantidad mensual usada promedio en los últimos 18 meses	Precio de Referencia Unitario	Cantidad monetaria promedio demanda anual	Cantidad monetaria promedio demanda anual acumulada	X - Porcentaje acumulado de artículos	Porcentaje individual de demanda anual	Y - Porcentaje individual de demanda anual	A - Apoyo logístico actual = X*(1-Y)/(Y-X)
1	H-701	203	$ 99,997.00	$ 243,326,033.33	$ 243,326,033.33	2.50%	23.93%	23.93%	8.88%
2	C-504	180	$ 87,909.00	$ 189,531,804.00	$ 432,857,837.33	5.00%	18.64%	42.56%	7.65%
3	I-209	255	$ 45,678.00	$ 139,926,940.00	$ 572,784,777.33	7.50%	13.76%	56.32%	6.71%
4	J-629	216	$ 30,868.00	$ 79,886,384.00	$ 652,671,161.33	10.00%	7.86%	64.18%	6.61%
5	D-321	232	$ 21,274.00	$ 59,340,277.33	$ 712,011,438.67	12.50%	5.83%	70.01%	6.52%
6	F-298	207	$ 21,378.00	$ 53,202,716.00	$ 765,214,154.67	15.00%	5.23%	75.24%	6.16%
7	F-320	258	$ 13,340.00	$ 41,291,746.67	$ 806,505,901.33	17.50%	4.06%	79.30%	5.86%
8	H-876	206	$ 13,337.00	$ 32,951,281.33	$ 839,457,182.67	20.00%	3.24%	82.54%	5.58%
9	D-343	228	$ 10,398.00	$ 28,428,132.00	$ 867,885,314.67	22.50%	2.80%	85.34%	5.25%
10	F-299	167	$ 12,820.00	$ 25,691,280.00	$ 893,576,594.67	25.00%	2.53%	87.87%	4.83%
11	A-219	189	$ 9,089.00	$ 20,625,970.67	$ 914,202,565.33	27.50%	2.03%	89.89%	4.45%
12	A-789	193	$ 8,000.00	$ 18,496,000.00	$ 932,698,565.33	30.00%	1.82%	91.71%	4.03%
13	G-564	228	$ 6,704.00	$ 18,310,858.67	$ 951,009,424.00	32.50%	1.80%	93.51%	3.46%
14	L-342	17	$ 83,432.00	$ 17,465,098.67	$ 968,474,522.67	35.00%	1.72%	95.23%	2.77%
15	L099	15	$ 67,898.00	$ 12,538,497.33	$ 981,013,020.00	37.50%	1.23%	96.46%	2.25%
16	J-702	19	$ 30,868.00	$ 6,996,746.67	$ 988,009,766.67	40.00%	0.69%	97.15%	1.99%
17	D-390	191	$ 2,291.00	$ 5,240,280.67	$ 993,250,047.33	42.50%	0.52%	97.67%	1.80%
18	Z-090	178	$ 1,310.00	$ 2,790,300.00	$ 996,040,347.33	45.00%	0.27%	97.94%	1.75%
19	Y-098	172	$ 1,238.00	$ 2,554,406.67	$ 998,594,754.00	47.50%	0.25%	98.19%	1.69%
20	U-897	178	$ 1,137.00	$ 2,422,568.00	$ 1,001,017,322.00	50.00%	0.24%	98.43%	1.62%
21	N-490	173	$ 1,040.00	$ 2,156,266.67	$ 1,003,173,588.67	52.50%	0.21%	98.64%	1.54%
22	N-672	182	$ 978.00	$ 2,136,604.00	$ 1,005,310,192.67	55.00%	0.21%	98.85%	1.44%
23	W-002	139	$ 1,084.00	$ 1,808,834.67	$ 1,007,119,027.33	57.50%	0.18%	99.03%	1.34%
24	L-090	16	$ 8,749.00	$ 1,697,306.00	$ 1,008,816,333.33	60.00%	0.17%	99.20%	1.23%
25	M-108	159	$ 637.00	$ 1,212,848.00	$ 1,010,029,181.33	62.50%	0.12%	99.32%	1.16%
26	R-987	173	$ 561.00	$ 1,164,262.00	$ 1,011,193,443.33	65.00%	0.11%	99.43%	1.07%
27	R-783	172	$ 552.00	$ 1,140,432.00	$ 1,012,333,875.33	67.50%	0.11%	99.54%	0.96%
28	S-785	186	$ 382.00	$ 852,369.33	$ 1,013,186,244.67	70.00%	0.08%	99.63%	0.88%
29	G-239	3	$ 25,424.00	$ 830,517.33	$ 1,014,016,762.00	72.50%	0.08%	99.71%	0.78%
30	J-321	1	$ 46,375.00	$ 525,583.33	$ 1,014,542,345.33	75.00%	0.05%	99.76%	0.73%
31	T-190	132	$ 331.00	$ 522,980.00	$ 1,015,065,325.33	77.50%	0.05%	99.81%	0.65%
32	M-063	9	$ 4,564.00	$ 492,912.00	$ 1,015,558,237.33	80.00%	0.05%	99.86%	0.56%
33	L-786	8	$ 5,435.00	$ 489,150.00	$ 1,016,047,387.33	82.50%	0.05%	99.91%	0.43%
34	Z-232	151	$ 231.00	$ 417,956.00	$ 1,016,465,343.33	85.00%	0.04%	99.95%	0.29%
35	Y-789	168	$ 175.00	$ 352,100.00	$ 1,016,817,443.33	87.50%	0.03%	99.98%	0.11%
36	D-395	2	$ 3,432.00	$ 84,656.00	$ 1,016,902,099.33	90.00%	0.01%	99.99%	0.07%
37	K-982	14	$ 232.00	$ 37,738.67	$ 1,016,939,838.00	92.50%	0.00%	100.00%	0.05%
38	K-920	19	$ 98.00	$ 22,866.67	$ 1,016,962,704.67	95.00%	0.00%	100.00%	0.03%
39	W-098	159	$ 8.00	$ 15,232.00	$ 1,016,977,936.67	97.50%	0.00%	100.00%	0.01%
40	O-786	194	$ 1.00	$ 2,332.00	$ 1,016,980,268.67	100.00%	0.00%	100.00%	

Demanda Total Año
$ 1,016,980,268.67

A actual promedio 2.65%

1	2	28	29	30	31	32
Ítem	Referencia	Nuevo Y para A de 3.85% con Y = X*(1+A)/(A+X)	CLASIFICACIÓN A B C con nuevo A y nuevo Y	Nuevo Porcentaje individual de demanda anual	Nuevo Demanda anual por referencia en Unidades Monetarias con nuevo A y nuevo Y	Nuevo Demanda acumulada anual en Unidades Monetarias con nuevo A y nuevo Y
1	H-701	40.89%	A	40.89%	$ 415,800,790.95	$ 415,800,790.95
2	C-504	58.67%	A	17.79%	$ 180,885,089.85	$ 596,685,880.80
3	I-209	68.62%	A	9.95%	$ 101,200,028.24	$ 697,885,909.04
4	J-629	75%	A	6.36%	$ 64,665,722.02	$ 762,551,631.05
5	D-321	79.40%	B	4.41%	$ 44,890,271.86	$ 807,441,902.91
6	F-298	82.64%	B	3.24%	$ 32,983,037.94	$ 840,424,940.86
7	F-320	85.12%	B	2.48%	$ 25,258,673.09	$ 865,683,613.94
8	H-876	87.09%	B	1.96%	$ 19,963,353.78	$ 885,646,967.72
9	D-343	88.68%	B	1.59%	$ 16,175,241.11	$ 901,822,208.83
10	F-299	89.99%	B	1.31%	$ 13,371,906.43	$ 915,194,115.26
11	A-219	91.10%	B	1.11%	$ 11,239,225.98	$ 926,433,341.24
12	A-789	92.04%	B	0.94%	$ 9,579,074.43	$ 936,012,415.67
13	G-564	92.85%	B	0.81%	$ 8,261,457.59	$ 944,273,873.26
14	L-342	93.56%	B	0.71%	$ 7,198,206.93	$ 951,472,080.19
15	L099	94.18%	C	0.62%	$ 6,327,807.06	$ 957,799,887.25
16	J-702	94.73%	C	0.55%	$ 5,606,278.32	$ 963,406,165.57
17	D-390	95.22%	C	0.49%	$ 5,001,501.80	$ 968,407,667.38
18	Z-090	95.67%	C	0.44%	$ 4,489,577.36	$ 972,897,244.74
19	Y-098	96.06%	C	0.40%	$ 4,052,422.80	$ 976,949,667.54
20	U-897	96.43%	C	0.36%	$ 3,676,153.27	$ 980,625,820.81
21	N-490	96.75%	C	0.33%	$ 3,349,963.98	$ 983,975,784.79
22	N-672	97.06%	C	0.30%	$ 3,065,345.12	$ 987,041,129.92
23	W-002	97.33%	C	0.28%	$ 2,815,520.75	$ 989,856,650.66
24	L-090	97.59%	C	0.26%	$ 2,595,041.44	$ 992,451,692.10
25	M-108	97.82%	C	0.24%	$ 2,399,484.44	$ 994,851,176.54
26	R-987	98.04%	C	0.22%	$ 2,225,229.94	$ 997,076,406.47
27	R-783	98.25%	C	0.20%	$ 2,069,292.31	$ 999,145,698.78
28	S-785	98.44%	C	0.19%	$ 1,929,191.27	$ 1,001,074,890.06
29	G-239	98.61%	C	0.18%	$ 1,802,852.62	$ 1,002,877,742.68
30	J-321	98.78%	C	0.17%	$ 1,688,530.96	$ 1,004,566,273.63
31	T-190	98.94%	C	0.16%	$ 1,584,749.09	$ 1,006,151,022.72
32	M-063	99.08%	C	0.15%	$ 1,490,250.04	$ 1,007,641,272.76
33	L-786	99.22%	C	0.14%	$ 1,403,958.78	$ 1,009,045,231.54
34	Z-232	99.35%	C	0.13%	$ 1,324,951.53	$ 1,010,370,183.07
35	Y-789	99.47%	C	0.12%	$ 1,252,430.92	$ 1,011,622,613.99
36	D-395	99.59%	C	0.12%	$ 1,185,705.78	$ 1,012,808,319.78
37	K-982	99.70%	C	0.11%	$ 1,124,174.60	$ 1,013,932,494.38
38	K-920	99.81%	C	0.10%	$ 1,067,311.95	$ 1,014,999,806.33
39	W-098	99.91%	C	0.10%	$ 1,014,657.19	$ 1,016,014,463.53
40	O-786	100.00%	C	0.09%	$ 965,805.14	$ 1,016,980,268.67

Nuevo A para 10 & 75 vale 3.85%

Demanda proyectada Total Año con A nuevo
$ 1,016,980,268.67

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Una vez se hacen los cálculos se deben revisar los resultados y definir políticas hacia los inventarios a mantener, después del cálculo ABC sin las referencias mencionadas, se obtiene el inventario promedio en unidades de dos maneras en este ejemplo, debe definir la empresa entonces cual de las dos cifras adopta, la cual puede ser diferente dependiendo de la compañía en particular.

5.6.3.4 Denominación Push[225] o Pull[226]

Una vez se cataloga su importancia en ABC, se desarrolla otro paso que sirve para optimizar el manejo y la gestión de los inventarios, el consiste en clasificar las referencias en *Push* o *Pull*, en función de la característica que deben cumplir dichos insumos o repuestos en la función de mantenimiento en la compañía y del sistema de reaprovisionamiento que se adopte para reponer el nivel de inventarios deseado en cada ítem.

Las referencias *Push*[227] siempre deben estar disponibles en el almacén de repuestos e insumos de mantenimiento, una vez se agota el inventario establecido y llega al nivel de reposición, se pide nuevamente para completar el nivel deseado a mantener permanentemente. Básicamente esta categoría trabaja contra el nivel real del inventario. Su demanda en la mayoría de las veces tiene patrones de conducta algo similares. Sus demandas futuras se calculan a partir de pronósticos por series temporales. Se trabajan cuando se tiene una cantidad inmensa de referencias.

En forma contraria los artículos *Pull*[228] solo se piden al proveedor o fabricante cuando son solicitados por mantenimiento, el saldo o remanente que queda como una especie de inventario es solo eso, un residuo de la solicitud anterior, por lo general en este categoría se mantienen los repuestos de escasa demanda o los muy costosos que no implican consecuencias negativas el no mantenerlos en *stock*, el tiempo de espera del proveedor o denominado *lead time* aparece como uno de los criterios importantes en este tipo de artículos.

Sus demandas casi siempre mantienen un comportamiento bastante irregular y aleatorio. Se usa esta categoría para repuestos no genéricos que solo sirven para una sola máquina o su proveedor es único. Se estiman en sus demandas futuras a partir de los históricos de la demanda, teniendo en cuenta que es más saludable obtener dichas demandas promedios, teniendo en cuenta la historia y los pronósticos de demanda, realizados con seres temporales.

5.6.3.4.1 Push

En el caso particular de los artículos tipo *Push*, en ocasiones los lotes de pedidos a los proveedores son mayores que el requerimiento, o la capacidad de fabricación de piezas excede la cantidad solicitada (como el caso contrario que la necesidad está por encima de la capacidad de fabricación) o el poder adquisitivo es superior a la necesidad; en cualquiera de los eventos anteriores se debe hacer una reasignación de las cantidades a solicitar por referencia[229], la cual se logra al seguir los siguientes pasos por medio del método de Asignación:

- Estimar la demanda para el siguiente período, mediante la técnica de series temporales
- Cuantificar el inventario disponible de la referencia para el período actual
- Calcular el error entre el pronóstico del mes actual y su demanda real
- Asignar el nivel de disponibilidad deseado en las diferentes referencias a estimar el inventario requerido a final del siguiente período
- Determinar los requisitos netos por referencia que se obtienen de adicionar el pronóstico del período siguiente al error de pronóstico del mes anterior
- Establecer los requerimientos netos como la diferencia entre los las cantidades disponibles y los requisitos totales
- Distribuir los excesos (o defectos) de los requerimientos netos entre el pronóstico de demanda del siguiente período

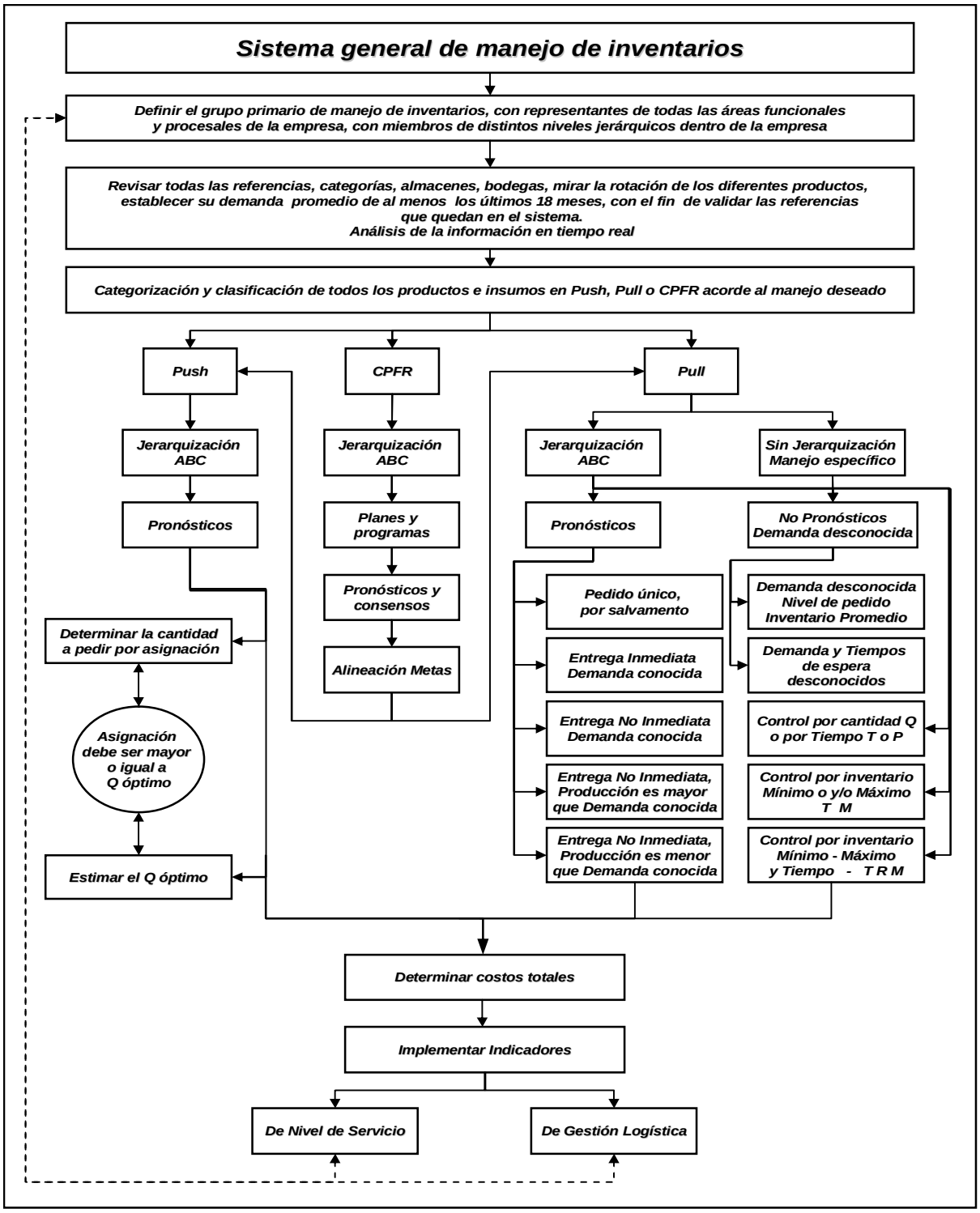
---

[225] *Referidos también como Technology Push, son referencias que se lanzan (empujan) desde las fábricas hacia el mercado.*
[226] *Conocidos como Demand Pull, son referencias que se demandan (jalonan) desde los mercados a las fábricas.*
[227] *Denominados Control de Inventarios por Incrementos.*
[228] *Denominados Control de Inventarios por Demanda.*
[229] *Debe ser la misma referencia o en el evento de que se trate de referencias diferentes debe ser calculada bajo la metodología de cantidades equivalentes, es decir bajo un mismo patrón de medida en términos de dinero, de horas de fabricación u otra escala.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Asignar las cantidades a solicitar por cada referencia para el siguiente período a partir de los excesos
- Definir la demanda o requisito específico y establecer el inventario deseado al final del período calculado[230]

Ilustración 130 - Ciclo general de inventarios



[230] *Se recomienda para referencias tipo A la cantidad 1.25 veces el consumo promedio (establecido mediante el cálculo de la venta o demanda del último período más el pronóstico (hallado por series temporales) del siguiente período, entre dos (2)), para los B se sugiere 0.75 veces la demanda promedio y para los ítems tipo C 0.35 veces.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 131 - Retiro de referencias e Inventario a mantener – ABC

1	2	21	22	23		24	25	26	27
Ítem	Referencia	Demanda o Cantidad mensual usada promedio en los últimos 18 meses	Precio de Referencia Unitario	Cantidad monetaria promedio demanda anual	Cantidad monetaria promedio demanda anual acumulada	X - Porcentaje acumulado de artículos	Porcentaje individual de demanda anual	Y - Porcentaje individual de demanda anual	A - Apoyo logístico actual = X*(1-Y)/(Y-X)
1	H-701	203	$ 99,997.00	$ 243,326,033.33	$ 243,326,033.33	3.23%	24.33%	24.33%	11.57%
2	C-504	180	$ 87,909.00	$ 189,531,804.00	$ 432,857,837.33	6.45%	18.95%	43.27%	9.94%
3	I-209	255	$ 45,678.00	$ 139,926,940.00	$ 572,784,777.33	9.68%	13.99%	57.26%	8.69%
4	J-629	216	$ 30,868.00	$ 79,886,384.00	$ 652,671,161.33	12.90%	7.99%	65.25%	8.57%
5	D-321	232	$ 21,274.00	$ 59,340,277.33	$ 712,011,438.67	16.13%	5.93%	71.18%	8.44%
6	F-298	207	$ 21,378.00	$ 53,202,716.00	$ 765,214,154.67	19.35%	5.32%	76.50%	7.96%
7	F-320	258	$ 13,340.00	$ 41,291,746.67	$ 806,505,901.33	22.58%	4.13%	80.63%	7.53%
8	H-876	206	$ 13,337.00	$ 32,951,281.33	$ 839,457,182.67	25.81%	3.29%	83.92%	7.14%
9	D-343	228	$ 10,398.00	$ 28,428,132.00	$ 867,885,314.67	29.03%	2.84%	86.77%	6.65%
10	F-299	167	$ 12,820.00	$ 25,691,280.00	$ 893,576,594.67	32.26%	2.57%	89.33%	6.03%
11	A-219	189	$ 9,089.00	$ 20,625,970.67	$ 914,202,565.33	35.48%	2.06%	91.40%	5.46%
12	A-789	193	$ 8,000.00	$ 18,496,000.00	$ 932,698,565.33	38.71%	1.85%	93.25%	4.79%
13	G-564	228	$ 6,704.00	$ 18,310,858.67	$ 951,009,424.00	41.94%	1.83%	95.08%	3.89%
14	L-342	17	$ 83,432.00	$ 17,465,098.67	$ 968,474,522.67	45.16%	1.75%	96.82%	2.78%
	L099	15	$ 67,898.00						
15	J-702	19	$ 30,868.00	$ 6,996,746.67	$ 6,996,746.67	48.39%	0.70%	0.70%	-100.76%
16	D-390	191	$ 2,291.00	$ 5,240,280.67	$ 12,237,027.33	51.61%	0.52%	1.22%	-101.17%
17	Z-090	178	$ 1,310.00	$ 2,790,300.00	$ 15,027,327.33	54.84%	0.28%	1.50%	-101.27%
18	Y-098	172	$ 1,238.00	$ 2,554,406.67	$ 17,581,734.00	58.06%	0.26%	1.76%	-101.31%
19	U-897	178	$ 1,137.00	$ 2,422,568.00	$ 20,004,302.00	61.29%	0.24%	2.00%	-101.31%
20	N-490	173	$ 1,040.00	$ 2,156,266.67	$ 22,160,568.67	64.52%	0.22%	2.22%	-101.26%
21	N-672	182	$ 978.00	$ 2,136,604.00	$ 24,297,172.67	67.74%	0.21%	2.43%	-101.20%
22	W-002	139	$ 1,084.00	$ 1,808,834.67	$ 26,106,007.33	70.97%	0.18%	2.61%	-101.11%
	L-090	16	$ 8,749.00						
23	M-108	159	$ 637.00	$ 1,212,848.00	$ 1,212,848.00	74.19%	0.12%	0.12%	-100.04%
24	R-987	173	$ 561.00	$ 1,164,262.00	$ 2,377,110.00	77.42%	0.12%	0.24%	-100.07%
25	R-783	172	$ 552.00	$ 1,140,432.00	$ 3,517,542.00	80.65%	0.11%	0.35%	-100.08%
26	S-785	186	$ 382.00	$ 852,369.33	$ 4,369,911.33	83.87%	0.09%	0.44%	-100.08%
	G-239	3	$ 25,424.00						
	J-321	1	$ 46,375.00						
27	T-190	132	$ 331.00	$ 522,980.00	$ 522,980.00	87.10%	0.05%	0.05%	-100.01%
	M-063	9	$ 4,564.00						
	L-786	8	$ 5,435.00						
28	Z-232	151	$ 231.00	$ 417,956.00	$ 417,956.00	90.32%	0.04%	0.04%	-100.00%
29	Y-789	168	$ 175.00	$ 352,100.00	$ 770,056.00	93.55%	0.04%	0.08%	-100.01%
	D-395	2	$ 3,432.00						
	K-982	14	$ 232.00						
	K-920	19	$ 98.00						
30	W-098	159	$ 8.00	$ 15,232.00	$ 15,232.00	96.77%	0.00%	0.00%	-100.00%
31	O-786	194	$ 1.00	$ 2,332.00	$ 17,564.00	100.00%	0.00%	0.00%	

Demanda Total Año
$ 1,000,261,041.33

A actual promedio	-50.34%

1	2	28	29	30	31	32
Ítem	Referencia	Nuevo Y para A de 3.85% con Y = X*(1+A)/(A+X)	CLASIFICACIÓN A B C con nuevo A y nuevo Y	Nuevo Porcentaje individual de demanda anual	Nuevo Demanda anual por referencia en Unidades Monetarias con nuevo A y nuevo Y	Nuevo Demanda acumulada anual en Unidades Monetarias con nuevo A y nuevo Y
1	H-701	47.34%	A	47.34%	$ 473,567,855.68	$ 473,567,855.68
2	C-504	65.04%	A	17.69%	$ 176,985,512.99	$ 650,553,368.67
3	I-209	74.29%	A	9.26%	$ 92,576,063.61	$ 743,129,432.28
4	J-629	80%	A	5.69%	$ 56,925,321.87	$ 800,054,754.15
5	D-321	83.84%	B	3.85%	$ 38,543,043.07	$ 838,597,797.23
6	F-298	86.62%	B	2.78%	$ 27,826,967.98	$ 866,424,765.21
7	F-320	88.72%	B	2.10%	$ 21,034,518.36	$ 887,459,283.58
8	H-876	90.37%	B	1.65%	$ 16,458,563.97	$ 903,917,847.54
9	D-343	91.69%	B	1.32%	$ 13,229,336.72	$ 917,147,184.27
10	F-299	92.78%	B	1.09%	$ 10,865,583.34	$ 928,012,767.61
11	A-219	93.69%	B	0.91%	$ 9,083,390.64	$ 937,096,158.25
12	A-789	94.46%	B	0.77%	$ 7,706,441.29	$ 944,802,599.54
13	G-564	95.12%	B	0.66%	$ 6,620,529.95	$ 951,423,129.50
14	L-342	95.69%	B	0.57%	$ 5,749,034.91	$ 957,172,164.41
	L099					
15	J-702	96.20%	C	96.20%	$ 962,211,157.03	$ 962,211,157.03
16	D-390	96.64%	C	0.45%	$ 4,452,841.74	$ 966,663,998.77
17	Z-090	97.04%	C	0.40%	$ 3,963,343.65	$ 970,627,342.41
18	Y-098	97.39%	C	0.35%	$ 3,550,355.54	$ 974,177,697.95
19	U-897	97.71%	C	0.32%	$ 3,198,722.04	$ 977,376,419.99
20	N-490	98.00%	C	0.29%	$ 2,896,863.26	$ 980,273,283.25
21	N-672	98.27%	C	0.26%	$ 2,635,808.15	$ 982,909,091.40
22	W-002	98.51%	C	0.24%	$ 2,408,519.63	$ 985,317,611.03
	L-090					
23	M-108	98.73%	C	98.73%	$ 987,527,025.97	$ 987,527,025.97
24	R-987	98.93%	C	0.20%	$ 2,034,019.31	$ 989,561,045.28
25	R-783	99.12%	C	0.19%	$ 1,878,712.13	$ 991,439,757.41
26	S-785	99.29%	C	0.17%	$ 1,740,538.51	$ 993,180,295.92
	G-239					
	J-321					
27	T-190	99.45%	C	99.45%	$ 994,797,363.52	$ 994,797,363.52
	M-063					
	L-786					
28	Z-232	99.60%	C	99.60%	$ 996,303,648.41	$ 996,303,648.41
29	Y-789	99.74%	C	0.14%	$ 1,406,509.45	$ 997,710,157.86
	D-395					
	K-982					
	K-920					
30	W-098	99.88%	C	99.88%	$ 999,026,487.66	$ 999,026,487.66
31	O-786	100.00%	C	0.12%	$ 1,234,553.68	$ 1,000,261,041.33

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 132 - Push & Pull

Síntesis de Diferencias Push versus Pull

Push	Pull
Trabajan contra un inventario	Trabajan contra producción o pedidos
Se mantienen en stock	No se mantienen en stock
Se calculan a partir de pronósticos	Se estiman a partir de demanda histñórica promedio (historia + pronósticos)
Cumplen la prueba del ACF	No cumplen ACF
Sus funciones no son aleatorias	Sus funciones son aleatorias
Los datos se correlacionan entre sí	Los datos no se correlacionan entre sí
Presentan una estructura regular	No presentan una estructura regular
Se usan cuando se tienen múltiples referencias	Se usa para referencias o almacenes especiales
Se piden periódicamente	Se piden solo cuando el nivel llega al ROP
Las cantidades a pedir se calculan con el mayor entre Asignación y EOQ	Siempre se pide el EOQ
Se fabrican continuamente	Solo se piden cuando el cliente los pide
Son estratégicos para las Empresas	No son tan relevantes
Su demanda es permanente	Su demanda es esporádica

(Mora, 2007c)

La disponibilidad se refiere a la cantidad que se desea tener, consiste en asignar una probabilidad de disponibilidad a partir de la distribución normal, es el caso hipotético de que si se presentan 100 solicitudes de un mismo repuesto en un determinado instante, cuántos se desea tener de ellos para responder a esas 100 demandas, por ejemplo si se desea tener una disponibilidad del 90% le corresponde una Z probabilística de 1.2816, se calcula con la distribución normal que se encuentra en el CD bajo la denominación de Programa de CD 6 - Distribución Normal Z y Probabilidades, como también la puede hallar en la Ilustración 101 – Tabla de distribución normal para probabilidades y Z.

Ejemplo 35 - Asignación de excesos para artículos Push

Se tienen cuatro referencias equivalentes, para las cuales se tienen las necesidades de demanda del próximo período, los inventarios del período anterior (actual), se cuenta con la disponibilidad definida mediante política empresarial y estimada de la curva de distribución normal, se calcula el error del mes anterior y se posee una capacidad del proveedor de 1329 unidades para todas las referencias.

Referencias equivalentes en la óptcia de asignación de excedentes	Nivel de Inventarios disponible, estimado al final del período actual	Pronóstico de la Demanda para el próximo período	Error del Pronóstico = Demanda real período anterior menos pronóstico período anterior	Nivel de Disponibilidad del Inventario, se calcula de la distribución normal	Z correspondiente a la probabilidad anterior de la curva de distribución normal	Total Requerido = demanda próximo período más error del pronóstico (Z por error del pronóstico) del período anterior (actual en este caso)	Requerimiento Neto = total requerido menos inventario disponible del período anterior (actual en este ejemplo)	Prorrateo del Excedente = Capacidad total del proveedor o del pedido posible (1329 en este ejemplo), menos Requerimiento total neto por porcentaje de la demanda del Pronóstico	Asignación = requerimiento neto más el excedente asignado	
	A	B	C	D	E	F	H	I	A	
J-629	989	216	878	85%	1.0364	1126	137	280	416	
F-298	365	207	132	92%	1.4051	393	28	269	297	
H-876	549	206	278	95%	1.6449	663	114	267	381	
F-299	392	167	198	89%	1.2265	410	18	217	234	
Suma	2295	796				2592	297	1032	1329	Capacidad total del proveedor o del pedido posible

Para el caso particular de las referencias *Push* del A B C, se tienen las siguientes cantidades ideales a pedir, junto con su cantidad de pedidos por año y su frecuencia:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 133 - Cantidades óptimas a pedir en Push

		Nuevo A para 10 & 75 vale 3.85%		Lote Económico Q = $\sqrt{2DS / IC}$							
				I	S	D	C	Q	N	T	
1	2	28	29								
Ítem	Referencia	Nuevo Y para A de 3.85% con Y = X*(1+A)/(A+X)	Tipo A B C	Costo de Manejo y Almacenamiento por unidad en porcentaje del costo	Costo Unitario de reponer por pedido	Demanda promedio año a partir de la última demanda y el pronóstico próximo período	Costo	Cantidad a pedir (pedido óptimo por costo) en unidades de la referencia	Número de pedidos óptimos a realizar por año	Frecuencia entre pedidos óptimos a realizar por año, en meses	Inventario recomendado por política de la empresa A=1.25 veces, B=0.75 veces y C=0.35 la D promedio
1	H-701	40.89%	A	0.00040%	$ 768.00	4158	$ 99,997.00	3996	1.04	12	5198
2	C-504	58.67%	A	0.00046%	$ 768.00	2058	$ 87,909.00	2811	0.73	16	2572
3	I-209	68.62%	A	0.00088%	$ 768.00	2216	$ 45,678.00	2917	0.76	16	2769
4	J-629	75%	A	0.00130%	$ 768.00	2095	$ 30,868.00	2836	0.74	16	2619
5	D-321	79.40%	B	0.00188%	$ 768.00	2110	$ 21,274.00	2847	0.74	16	1583
6	F-298	82.64%	B	0.00187%	$ 768.00	1543	$ 21,378.00	2434	0.63	19	1157
7	F-320	85.12%	B	0.00300%	$ 768.00	1893	$ 13,340.00	2696	0.70	17	1420
8	H-876	87.09%	B	0.00300%	$ 768.00	1497	$ 13,337.00	2397	0.62	19	1123
9	D-343	88.68%	B	0.00385%	$ 768.00	1556	$ 10,398.00	2444	0.64	19	1167
10	F-299	89.99%	B	0.00312%	$ 768.00	1043	$ 12,820.00	2001	0.52	23	782
11	A-219	91.10%	B	0.00440%	$ 768.00	1237	$ 9,089.00	2179	0.57	21	927
12	A-789	92.04%	B	0.00500%	$ 768.00	1197	$ 8,000.00	2144	0.56	21	898
13	G-564	92.85%	B	0.00597%	$ 768.00	1232	$ 6,704.00	2175	0.57	21	924
14	L-342	93.56%	B	0.00048%	$ 768.00	86	$ 83,432.00	576	0.15	80	65
15	L099	94.18%	C	0.00059%	$ 768.00	93	$ 67,898.00	598	0.16	77	33
16	J-702	94.73%	C	0.00130%	$ 768.00	182	$ 30,868.00	835	0.22	55	64
17	D-390	95.22%	C	0.01746%	$ 768.00	2183	$ 2,291.00	2895	0.75	16	764
18	Z-090	95.67%	C	0.03053%	$ 768.00	3427	$ 1,310.00	3628	0.94	13	1200
19	Y-098	96.06%	C	0.03231%	$ 768.00	3273	$ 1,238.00	3545	0.92	13	1146
20	U-897	96.43%	C	0.03518%	$ 768.00	3233	$ 1,137.00	3524	0.92	13	1132
21	N-490	96.75%	C	0.03846%	$ 768.00	3221	$ 1,040.00	3517	0.92	13	1127
22	N-672	97.06%	C	0.04090%	$ 768.00	3134	$ 978.00	3469	0.90	13	1097
23	W-002	97.33%	C	0.03690%	$ 768.00	2597	$ 1,084.00	3158	0.82	15	909
24	L-090	97.59%	C	0.00457%	$ 768.00	297	$ 8,749.00	1067	0.28	43	104
25	M-108	97.82%	C	0.06279%	$ 768.00	3767	$ 637.00	3803	0.99	12	1318
26	R-987	98.04%	C	0.07130%	$ 768.00	3967	$ 561.00	3903	1.02	12	1388
27	R-783	98.25%	C	0.07246%	$ 768.00	3749	$ 552.00	3794	0.99	12	1312
28	S-785	98.44%	C	0.10471%	$ 768.00	5050	$ 382.00	4404	1.15	10	1768
29	G-239	98.61%	C	0.00157%	$ 768.00	71	$ 25,424.00	522	0.14	88	25
30	J-321	98.78%	C	0.00086%	$ 768.00	36	$ 46,375.00	374	0.10	123	13
31	T-190	98.94%	C	0.12085%	$ 768.00	4788	$ 331.00	4288	1.12	11	1676
32	M-063	99.08%	C	0.00876%	$ 768.00	327	$ 4,564.00	1120	0.29	41	114
33	L-786	99.22%	C	0.00736%	$ 768.00	258	$ 5,435.00	996	0.26	46	90
34	Z-232	99.35%	C	0.17316%	$ 768.00	5736	$ 231.00	4693	1.22	10	2008
35	Y-789	99.47%	C	0.22857%	$ 768.00	7157	$ 175.00	5242	1.37	9	2505
36	D-395	99.59%	C	0.01166%	$ 768.00	345	$ 3,432.00	1152	0.30	40	121
37	K-982	99.70%	C	0.17241%	$ 768.00	4846	$ 232.00	4314	1.12	11	1696
38	K-920	99.81%	C	0.40816%	$ 768.00	10891	$ 98.00	6467	1.68	7	3812
39	W-098	99.91%	C	5.00000%	$ 768.00	126832	$ 8.00	22069	5.75	2	44391
40	O-786	100.00%	C	40.00000%	$ 768.00	965805	$ 1.00	60899	15.86	1	338032
		Nuevo A para 10 & 75 vale 3.85%									

La estimación de la cantidad de pedido óptima en las referencias P*ush*, se realiza mediante la aplicación de la siguiente fórmula que optimiza los costos de almacenamiento y manejo del inventario.

Ecuación 68 - Cantidad óptima a pedir, con el mínimo costo para reponer inventarios - EOQ[231].

$$\text{Costo Total de Pedir} = \frac{D}{Q} * S + \frac{I * C * Q}{2}$$, donde

TC = Costo total pertinente anual en unidades monetarias (um)
Q = tamaño del pedido a realizar para reponer el inventario deseado, de la referencia requerida
D = Demanda anual del artículo en reposición, el cual sucede a una tasa promedio conocida o que se puede pronosticar con series temporales
S = Costo de adquirir, es decir es el costo de lanzar un pedido, en unidades monetarias por pedido
C = Costo de una unidad del artículo en estudio, también se puede definir también como el valor de una unidad de la referencia en reposición, en unidades monetarias por artículo
I = Costo del manejo de la referencia en las bodegas o almacenes, se define normalmente como un porcentaje del valor del artículo, se trabaja en porcentaje costo por año
El término D/Q es el número de veces que se colocan pedidos de esa referencia en un año
La expresión Q/2 representa la cantidad promedio del inventario disponible de la referencia en reposición

Si se deriva la expresión anterior contra el costo, buscando optimizar el valor para determinar la cantidad óptima Q* a pedir, se encuentra matemáticamente la expresión:

[231] *EOQ – Economic Order Quantity – Cantidad Óptima mínima a pedir – Cantidad Económica a Pedir – Lote Óptimo*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$\text{Pedido óptimo con al mínimo costo} = Q^* = \sqrt{\frac{2*D*S}{I*C}},$$

$$\text{el número óptimo de pedidos por año es} \quad N = \frac{D}{Q^*} \quad y$$

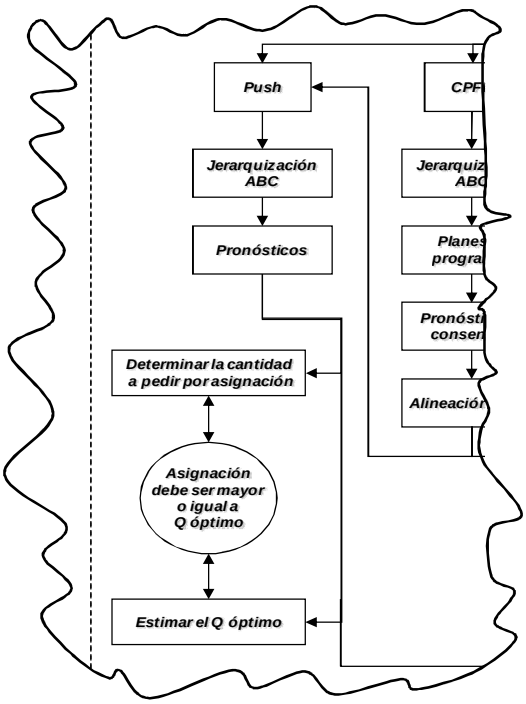
$$\text{el tiempo óptimo entre pedidos es} \quad T^* = \frac{Q^*}{D}, \text{ dado en unidades de tiempo de años}$$

(Ballou, 2004)

Para realizar su propio ejercicio puede utilizar la ayuda de la plantilla Excel, que se encuentra en el CD adjunto bajo el nombre de Programa de CD 12 – Cálculos Asignación & *EOQ Push*.

Programa de CD 12 - Cálculos Asignación & EOQ Push

Ilustración 134 - Pedir en Push el máximo de Asignación versus EOQ



Es importante resaltar nuevamente que en los *Push*, en cada Referencia para determinar la cantidad a pedir periódicamente[232], se debe tomar la cifra mayor entre lo que se calcula por el método de Asignación y el del *EOQ*, esto garantiza que el volumen que se pida siempre es igual o mayor al óptimo del *EOQ*.

En los *Pull*, solo se pide en el momento que el nivel del inventario se acerca o es igual al nivel de reposición *ROP*, que difiere para los productos o repuestos, Tipo A, B y/o C (siendo estos de más baja rotación e importancia); también es bueno destacar que en los *Pull* la cantidad que se pide es la resultante del cálculo por el método *EOQ*.

5.6.3.4.2 Pull

El siguiente paso en los artículos *Pull*, es determinar el tipo de reaprovisionamiento que se va a utilizar, para así poder establecer las cantidades a pedir y los tiempos en que se deben realizar los pedidos óptimos. Entre los más relevantes están: modelos de revisión continua y periódica, o para sistemas de justo a tiempo.

[232] *Cada mes, cada quince días, etc., en función de los períodos de producción o de mantenimiento.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

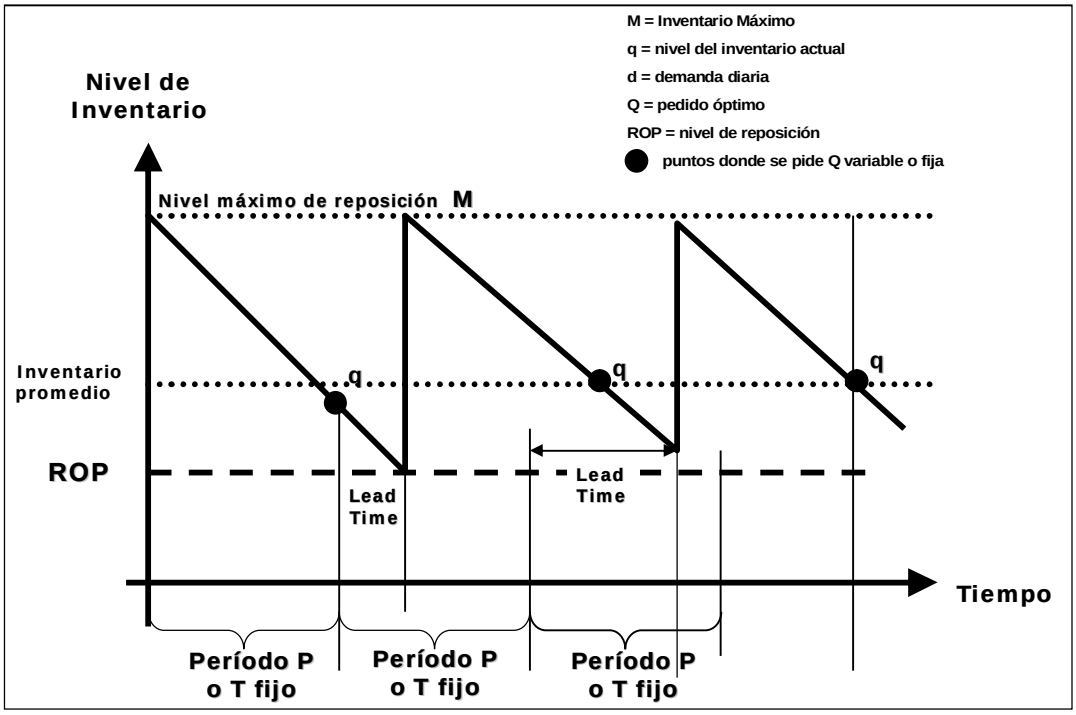
La reposición del inventario en los elementos *Pull*, establece varias opciones de controlar la gestión o la operación de los inventarios, entre ellas resaltan:

- Sistema Q, se pide una cantidad fija Q en períodos de tiempo variable, es útil para pedidos únicos.
- Sistema P o T, se solicita una cantidad Q variable, con revisión en períodos de tiempo T fijos.
- Sistema R - M (Mínimo - Máximo), el pedido se lanza cuando el inventario al disminuir en el tiempo con la demanda alcanza un valor predeterminado denominado ROP (Nivel de Reaprovisionamiento), la cantidad que se pide (M-q) es la diferencia entre un máximo preestablecido y la cantidad disponible q de ese instante, se garantiza de esta forma que el inventario nunca se debe romper, por debajo del ROP prefijado y calculado.
- Sistema T – R – M, es exactamente igual al anterior R-M, solo que adiciona revisiones en períodos de tiempos constantes T, el pedido se lanza cuando se dé alguna de las dos situaciones (ROP o T) primero que la otra, garantizando aún más la estabilidad del inventario.

Los productos Pull son normalmente establecidos para aquellas categorías de más baja rotación o de uso muy especial, o para algunas bodegas especiales, pero en general en ellos predomina la política de no tener *stock* del repuesto y solo se piden cuando mantenimiento o producción los pide a compras o a almacén de insumos o repuestos.

El sistema Q con reabastecimiento instantáneo o no, es denominado de control básico y los demás *P* o *T*, *R - M*[233] y *T - R - M*[234] son conocidos como de control avanzado de inventarios por demanda en *Pull* (Ballou, 2004).

Ilustración 135 - Parámetros relevantes en reposición Pull

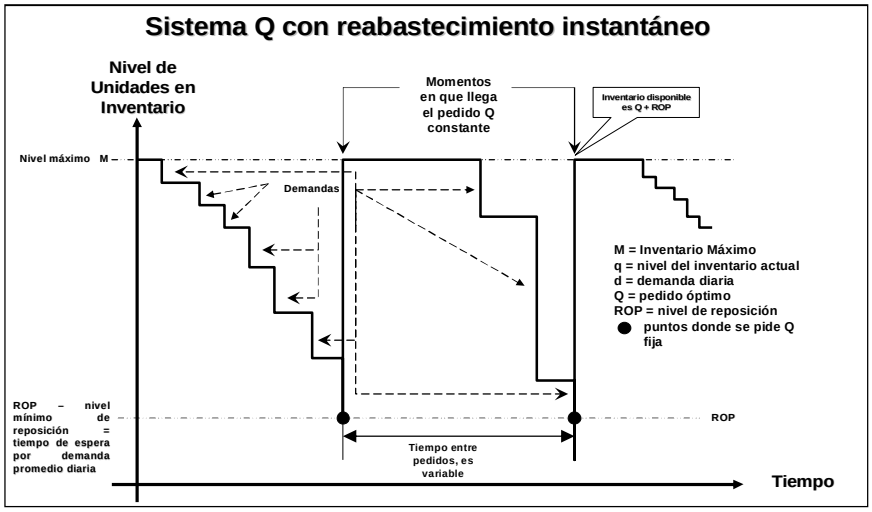


El sistema Q con reabastecimiento instantáneo, funciona en forma normal bajo la premisa de reposición inmediata con *lead time*[235] cero.

[233] *R – M, se refiere a un inventario que se debe mover entre un mínimo del ROP o Nivel de reaprovisionamiento y la M por un tope Máximo.*
[234] *R-M-T, es el mismo R-M, pero tiene un componente adicional que consiste en revisiones periódicas del nivel del inventario en un tiempo T.*
[235] *Lead Time – Tiempo de espera, entre el instante que se pide y el momento en que arriba el pedido a mantenimiento.*

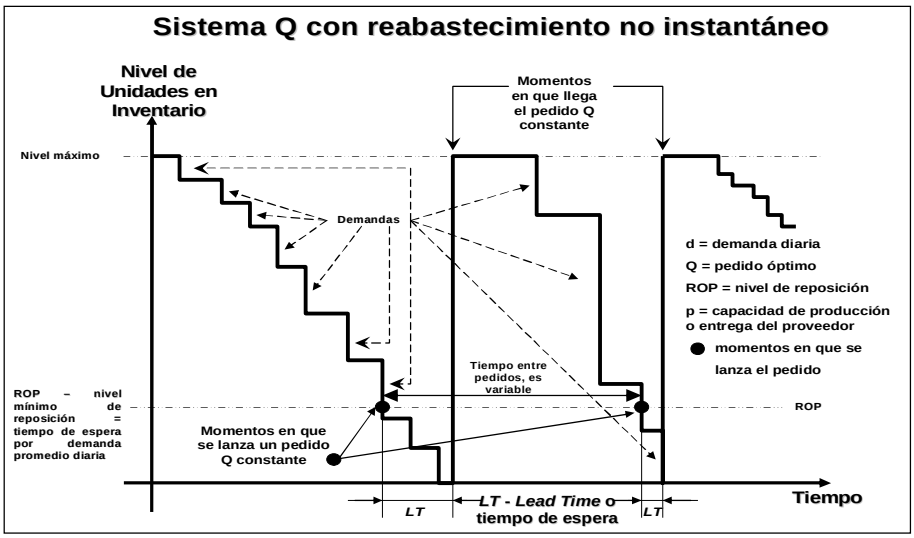
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 136 - Sistema Q con lead time cero



En el sistema *Q*[236] con reabastecimiento instantáneo el *Q** óptimo se realiza a partir de la fórmula definida en la Ecuación 68 - Cantidad óptima a pedir, con el mínimo costo para reponer inventarios - EOQ., con el mínimo costo para reponer inventarios.

Ilustración 137 - Sistema Q en Pull con lead time positivo



Cuando existe un *lead time* positivo o sea que la reposición no es inmediata, se estima el pedido óptimo igual que el anterior pero multiplicándolo por un factor de corrección.

Ecuación 69 - Pedido óptimo con reposición no inmediata.

$$\text{Pedido óptimo con mínimo costo} = Q^* = \sqrt{\frac{2*D*S}{I*C}} * \sqrt{\frac{p}{p-d}}\ , \quad donde$$

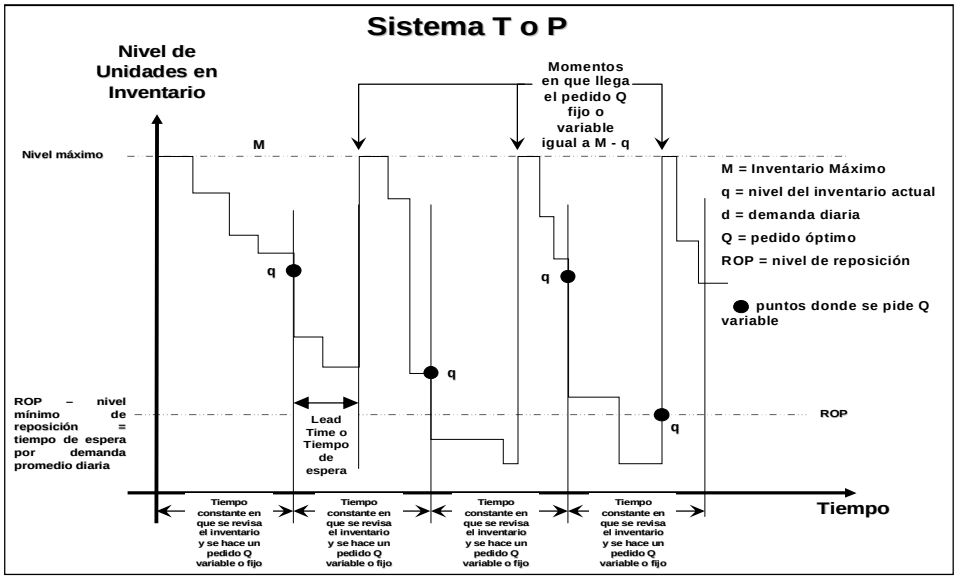
p es la capacidad de producción o de entrega diaria del fabricante o proveedor y d es la demanda diaria del repuesto o referencia .

(Ballou, 2004)

[236] *Q – Del inglés Quantity – Se refiere a la cantidad a pedir, fabricar o usar.*

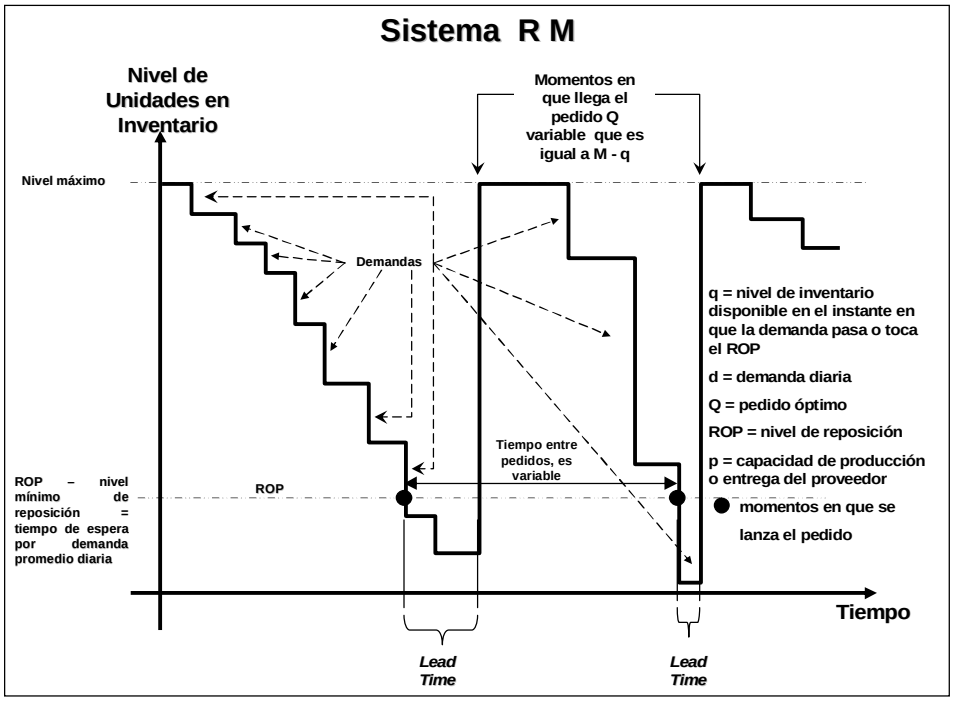
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 138 - Sistema T o P en Pull



Los sistemas *Q* y *T-P* conllevan riesgo y no son muy seguros, en el *Q* se tiene la posibilidad de que la demanda no repita en los volúmenes establecidos y puede generar remanente y el *T-P* tiene la incertidumbre de que el inventario se rompa o alcance su valor cero, antes de que se cumpla el período de revisión constante; por eso son más seguros y confiables los sistemas *R-M* y *T-R-M*.

Ilustración 139 - Sistema R-M (Mínimo-Máximo) en Pull



Ecuación 70 - Estimación del nivel máximo M de inventarios de Pull.

$$M = \text{Nivel máximo de inventario} = ROP + Q^{*} - DE \text{ , con}$$

$$ROP = d * LT + z * S'_{d} + DE$$

donde

d = demanda diaria promedio en unidades

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

LT = Lead Time = Tiempo de entrega (o de espera)

La Z se obtiene de la distribución normal para una probabilidad dada

$S'_d = S_d * \sqrt{LT}$

DE = Déficit esperado en el peor de los eventos, en unidades

$Q^* = \sqrt{\frac{2*D*S}{I*C}}$ = pedido óptimo al minimizar costos de pedir y almacenar

En síntesis al reemplazr todo en una sola expresión queda así:

$M = d * LT + z * S_d * \sqrt{LT} + DE + Q^* - DE$

al eliminar las DE, se concvierte en

$M = d * LT + z * S_d * \sqrt{LT} + Q^*$ = Inventario máximo a mantener

Los elementos de cálculo se deben revisar periódicamente

Ejemplo 36 - Cálculo de M, nivel máximo de inventarios en Pull

La referencia *Pull* J-980, tiene una demanda promedio diaria de D=365 unidades por año, con una desviación estándar de S_d = 9 artículos, el proveedor vende al almacén de repuestos a razón de $ 34 unidades monetarias cada unidad, el valor de realizar un pedido por parte del almacén es de $ 8.56 unidades monetarias, los costos de manejo anual de la referencia es el 23% y el *lead time* del proveedor es de LT = 8 días calendario; se desea que la probabilidad de tener siempre artículos disponibles en inventarios sea como mínimo del 90%; la demanda promedio diaria es de 1 artículo y el máximo déficit esperado DE (o se estima por la desviación estándar histórica de los últimos dieciocho meses) se estima en 2 unidades.

La Z de la distribución normal para una probabilidad del 90% es de 1.2816, con lo cual

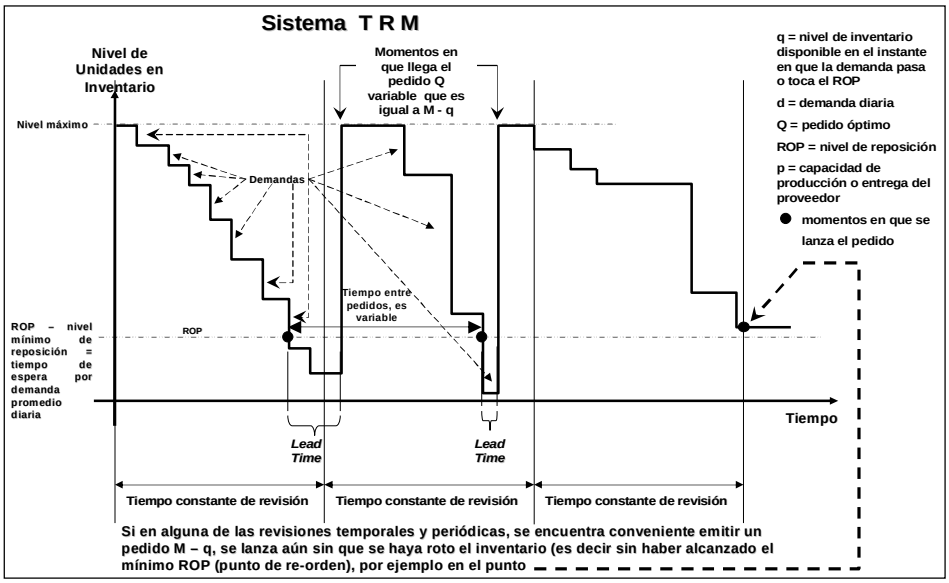
ROP= 1*8 +1.2816*9 + 2 = 21.53 unidades, como nivel mínimo de inventario.

$$Q^* = \sqrt{\frac{2*D*S}{I*C}} = \sqrt{\frac{2*365*8.56}{0.23*34}} = 28.26 \text{ unidades}$$

$$M = ROP + Q^* - DE = 21.53 + 28.26 - 2 = 47.79 \text{ unidades}$$

De esta forma se puede estimar en cualquier instante el pedido a lanzar, mediante la expresión M - q, donde M se calcula con las ecuaciones definidas y q se mide en la realidad el día del pedido. El sistema *T-M*, minimiza la posibilidad de que se rompa el inventario o se agote la referencia, esto solo sucede en el evento en el que la demanda supere el *lead time*. Con el fin de asegurar más la garantía de existencia permanente, se hacen controles de revisión periódicos a tiempos constantes, lo que da lugar al sistema *T-R-M*.

Ilustración 140 - Sistema T-R-M en Pull



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

De los conceptos emitidos sobre las referencias tipo *Pull*, se deduce que:

Ilustración 141 - Combinaciones posibles Q de demanda y Q de reposición

Compiortamiento de la demanda	Cantidad a pedir por Reposición
Variable	Fija
Fija	Variable
Variable	Fija
Fija	Variable

Formas *Push* vs. *Pull*	Períodos de tiempo a pedir	Cantidades a pedir
Push	Fijos	Mayor entre Asignación y *EOQ*
Pull	Variables, en función del ROP	EOQ

(Mora, 2007c)

Al utilizar los diferentes sistemas de los artículos *Pull*, se puede recomendar, para repuestos tipo:

A, la utilización de los sistemas *T-R-* o *T-M*
B, el uso de sistemas tipo *T M*
C, el manejo de los sistemas T o P, o en su reemplazo el Q, según el caso particular.

El proceso *Pull* tiene en cuenta varios parámetros para definir la cantidad *Q* a pedir y los tiempos de pedido, entre ellos sobresalen: el costo de salvamento de los excedentes (dado que en *Pull* solo se pide cuando existe una demanda y dado que los artículos son muy específicos y no son genéricos inutilizables en otros equipos, lo más seguro es que haya remanentes lo que eventualmente puede generar el excedente) y el *lead time* o tiempo de espera entre el momento de pedir y recibir el pedido del proveedor.

En ocasiones, cuando los repuestos son únicos y no sirven en otros equipos, es importante tener en cuenta, que no deben quedar remanentes que se pierdan; en este para estimar la cantidad a pedir se debe tener en cuenta las siguientes expresiones para dicha estimación.

La cual garantiza que con la utilidad de los repuestos usados, los que no se utilicen quedan salvados económicamente con la anterior ganancia.

Ecuación 71 - Estimadores de cantidades únicas especiales en Pull.

$$\text{Cantidad única a pedir} = Q^* = P + Z * S_d \text{, donde}$$

$$P = \text{Pronóstico calculado de demanda total}$$

$$S_d = \text{desviación estándar de lo hasta ahora demandado}$$

$$\text{Probabilidad} = \frac{\text{Utilidad unitaria}}{\text{Utilidad unitaria} + \text{Pérdida unitaria}}$$

$$\text{Utilidad unitaria} = \text{Venta (o costo total)} - \text{Precio unitario de adquisición}$$

$$\text{Pérdida unitaria} = \text{Precio adquisición unitario del proveedor} - \text{Costo de Salvamento}$$

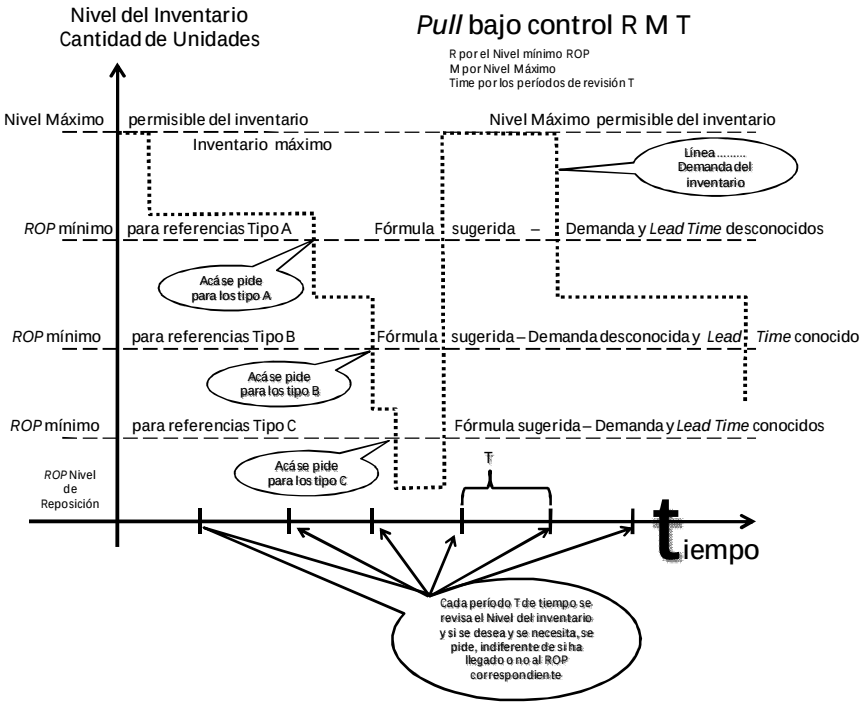
Una vez calculada la Probabilidad se encuentra Z en la tabla pertinente de Distribución Normal

Costo de Salvamento es el precio a que se puede vender o reducir el artículo, para lograr recuperar la inversión o minimizar pérdidas

(Ballou, 2004)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 142 - Tiempos y momentos de pedir Pull bajo RMT



(Ballou, 2004)

Ecuación 72 - ROP - Tipo C - Demanda y LT conocidos, tiempo de entrega inmediata

$$ROP = demanda\ promedio\ (mes) * Lead\ Time$$

Ecuación 73 - ROP - Tipo B - Demanda desconocida y LT conocido

$$ROP = demanda\ promedio * Lead\ Time$$
$$+ Nivel\ de\ Significación\ z * Desviación\ Estándar * \sqrt{LT}$$

Ecuación 74 - ROP - Tipo A - Demanda y LT desconocidos

$$ROP = demanda\ promedio * Lead\ Time$$
$$+ Nivel\ de\ Significación\ z * DesviaciónEstándarCensurada$$

$$DesviaciónEstándarCensurada = \sqrt{LT * S_d + D^2 * S^2_{TE}}$$

donde

TE es el tiempo de espera (lead time)

S_d *es la desviación estándar de la demanda*

D es demanda por unidad de tiempo

S_{TE} *es la desviación estándar de los diferentes tiempos de espera*

Al utilizar los diferentes sistemas de los artículos *Pull*, se puede recomendar, para repuestos tipo:

- A, la utilización de los sistemas *T-R-* o *T-M*
- B, el uso de sistemas tipo *T M*
- C, el manejo de los sistemas T o P, o en su reemplazo el Q, según el caso particular.

El proceso *Pull* tiene en cuenta varios parámetros para definir la cantidad Q a pedir y los tiempos de pedido, entre ellos sobresalen: el costo de salvamento de los excedentes (dado que en *Pull* solo se pide cuando existe una

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

demanda y dado que los artículos son muy específicos y no son genéricos inutilizables en otros equipos, lo más seguro es que haya remanentes lo que eventualmente puede generar el excedente) y el *lead time* o tiempo de espera entre el momento de pedir y recibir el pedido del proveedor.

Ejemplo 37 - Cantidad óptima para pedidos Pull únicos

Una máquina requiere unos amortiguadores especiales que solo son fabricados por un proveedor en el mundo, el pronóstico de la demanda esperada para el tiempo útil de la máquina es de 34 espirales, el comportamiento de la demanda se asimila a una distribución normal con una desviación estándar de 8 elementos de amortiguación, el precio de adquisición son 12 unidades monetarias, el costo de salvamento se estima en 4 unidades monetarias, el costo total de adquirirlos es de 37 unidades monetarias (incluyendo todos los conceptos de compra).

$$Utilidad\,unitaria = \text{Venta (Costo Total)} - \text{Precio unitario de adquisición del proveedor} = 37 - 12 = 25\ u.m.$$

$$Pérdida\,unitaria = \text{Precio de adquisión unitario del proveedor} - \text{Costo de Salvamento} = 12 - 4 = 8\ u.m.$$

$$Probabilidad = \frac{Utilidad}{Utilidad + Pérdida} = \frac{25}{25+8} = 75.75\,\%\text{, lo que implica una Z de la distribución normal de 0.6983}$$

$$Cantidad\ única\ a\ pedir = Q^* = \text{Pronóstico de la demanda total} + Z * S_d = 34 + 0.6983*8 = 39.58 \text{ amortiguadores}$$

para toda la existencia de la máquina

De esta forma se optimiza la compra del repuesto requerido, en el evento de que quedasen algunos remanentes.

Ilustración 143 - Cantidades óptimas a pedir en Pull

Tipo	Ítem #	Referencia	Demanda Promedio Mes en unidades monetarias	Costo total de adquisición del proveedor	Demanda Promedio Mes en unidades	d - Demanda Promedio día en unidades	Demanda Promedio Anuales en unidades monetarias	Inventario referencia final mes anterior	Demanda período anterior	Pronóstico de Demanda anterior	Error período anterior - Demnads menos Pronósticos
PULL	1	GHJ-980	$ 3,415,070.00	$ 33,428.00	102	5.11	$ 40,980,840	0	1000	345	655
PULL	2	GFJ-980	$ 1,722,720.00	$ 6,724.00	256	12.81	$ 92,734,663	240	24	567	-543
PULL	3	LKJ-567	$ 1,543,950.00	$ 19,783.00	78	3.90	$ 86,746,500	123	678	345	333
PULL	4	MVC-342	$ 1,125,109.25	$ 760.00	1480	74.02	$ 84,267,663	2	567	897	-330
PULL	5	CVD-904	$ 928,110.00	$ 4,345.00	214	10.68	$ 81,054,368	123	345	567	-222
PULL	6	AKJ-093	$ 809,030.00	$ 10,727.00	75	3.77	$ 78,284,975	567	345	234	111
PULL	7	JUS-435	$ 664,099.70	$ 3,922.00	169	8.47	$ 72,422,056	324	567	492	75
PULL	8	REM-982	$ 531,618.75	$ 9,960.00	53	2.67	$ 63,790,664	539	3456	492	2964
PULL	9	WOC-327	$ 510,030.00	$ 3,232.00	158	7.89	$ 63,375,129	640	345	492	-147
PULL	10	LKM-786	$ 3,234,444.00	$ 12,756.00	254	12.68	$ 61,683,757	816	123	492	-369
PULL	11	NAO-983	$ 361,622.40	$ 33,243.00	11	0.54	$ 60,640,031	345	876	492	384
PULL	12	HJS-381	$ 360,720.00	$ 323.00	1117	55.84	$ 60,180,797	234	123	492	-369
PULL	13	GVS-789	$ 210,898.85	$ 22,370.00	9	0.47	$ 60,073,241	123	678	492	186
PULL	14	WRQ-392	$ 203,470.00	$ 123.00	1654	82.71	$ 58,977,052	232	567	492	75
PULL	15	ESR-783	$ 82,545.20	$ 1,435.00	58	2.88	$ 58,709,710	123	345	492	-147
PULL	16	DFE-132	$ 82,479.00	$ 213.00	387	19.36	$ 55,094,992	567	345	491	-146
PULL	17	WOP-439	$ 68,650.20	$ 2,325.00	30	1.48	$ 54,302,860	324	567	491	76
PULL	18	HSO-782	$ 51,618.00	$ 4,534.00	11	0.57	$ 52,036,536	539	3456	491	2965
PULL	19	ZSQ-327	$ 42,080.40	$ 2,134.00	20	0.99	$ 51,970,300	640	345	491	-146
PULL	20	XQR-324	$ 35,067.00	$ 8,155.00	4	0.22	$ 51,538,871	816	123	491	-368

Ítem #	Referencia	*Lead Time* más alto de los diferentes proveedores, en días calendario	*Déficit máximo esperado y permitido*	*Disponibilidad deseada mínima*	*Z de la distribución normal para probabilidad anterior*	*Desviación Estándar de la demanda - S_d*	ROP - Inventario mínimo a mantener	ROP - Inventario mínimo a mantener con stock de seguridad adicional 15 días de demanda	Inventario máximo a mantener
1	GHJ-980	24	8	65.00%	0.39	98	123	199	2330
2	GFJ-980	1	11	55.00%	0.13	246	13	205	3480
3	LKJ-567	27	20	97.00%	1.88	75	105	164	2143
4	MVC-342	2	18	85.00%	1.04	1421	148	1258	9880
5	CVD-904	5	7	58.00%	0.20	205	53	214	3232
6	AKJ-093	35	10	64.00%	0.36	72	132	189	2022
7	JUS-435	16	8	63.00%	0.33	163	135	262	2983
8	REM-982	19	8	64.00%	0.36	51	51	91	1637
9	WOC-327	35	4	84.00%	0.99	151	276	395	3123
10	LKM-786	40	17	97.00%	1.88	243	507	697	4383
11	NAO-983	15	2	69.00%	0.50	10	8	16	721
12	HJS-381	6	19	84.00%	0.99	1072	335	1173	8575
13	GVS-789	28	2	77.00%	0.74	9	13	20	679
14	WRQ-392	3	25	84.00%	0.99	1588	248	1489	10558
15	ESR-783	44	0	71.00%	0.55	55	127	170	1785
16	DFE-132	21	3	97.00%	1.88	372	407	697	5330
17	WOP-439	41	1	55.00%	0.13	28	61	83	1231
18	HSO-782	0	21	63.00%	0.33	11	0	9	728
19	ZSQ-327	24	5	99.00%	2.33	19	24	38	1021
20	XQR-324	18	1	62.00%	0.31	4	4	7	450
							Demanda diaria X *Lead Time*	(Demanda diaria + 15) X *Lead Time*	M = ROP + Q* - DE

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

				I	S	D	C	Q*
Ítem #	Referencia	Demanda Promedio Mes en unidades monetarias	Costo total de adquisición del proveedor	Costo de Manejo y Almacenamiento por unidad en porcentaje del costo	Costo Unitario de reponer por pedido	Demanda promedio año a partir de la última demanda y el pronóstico próximo período	Costo	Cantidad a pedir (pedido óptimo por costo) en unidades de la referencia
1	GHJ-980	$ 3,415,070.00	$ 33,428.00	0.00120%	$ 768.00	1226	$ 33,428.00	2170
2	GFJ-980	$ 1,722,720.00	$ 6,724.00	0.00595%	$ 768.00	3074	$ 6,724.00	3436
3	LKJ-567	$ 1,543,950.00	$ 19,783.00	0.00202%	$ 768.00	937	$ 19,783.00	1896
4	MVC-342	$ 1,125,109.25	$ 760.00	0.05263%	$ 768.00	17765	$ 760.00	8259
5	CVD-904	$ 928,110.00	$ 4,345.00	0.00921%	$ 768.00	2563	$ 4,345.00	3137
6	AKJ-093	$ 809,030.00	$ 10,727.00	0.00373%	$ 768.00	905	$ 10,727.00	1864
7	JUS-435	$ 664,099.70	$ 3,922.00	0.01020%	$ 768.00	2032	$ 3,922.00	2793
8	REM-982	$ 531,618.75	$ 9,960.00	0.00402%	$ 768.00	641	$ 9,960.00	1568
9	WOC-327	$ 510,030.00	$ 3,232.00	0.01238%	$ 768.00	1894	$ 3,232.00	2697
10	LKM-786	$ 3,234,444.00	$ 12,756.00	0.00314%	$ 768.00	3043	$ 12,756.00	3418
11	NAO-983	$ 361,622.40	$ 33,243.00	0.00120%	$ 768.00	131	$ 33,243.00	708
12	HJS-381	$ 360,720.00	$ 323.00	0.12384%	$ 768.00	13401	$ 323.00	7174
13	GVS-789	$ 210,898.85	$ 22,370.00	0.00179%	$ 768.00	113	$ 22,370.00	659
14	WRQ-392	$ 203,470.00	$ 123.00	0.32520%	$ 768.00	19851	$ 123.00	8731
15	ESR-783	$ 82,545.20	$ 1,435.00	0.02787%	$ 768.00	690	$ 1,435.00	1628
16	DFE-132	$ 82,479.00	$ 213.00	0.18779%	$ 768.00	4647	$ 213.00	4224
17	WOP-439	$ 68,650.20	$ 2,325.00	0.01720%	$ 768.00	354	$ 2,325.00	1166
18	HSO-782	$ 51,618.00	$ 4,534.00	0.00882%	$ 768.00	137	$ 4,534.00	724
19	ZSQ-327	$ 42,080.40	$ 2,134.00	0.01874%	$ 768.00	237	$ 2,134.00	953
20	XQR-324	$ 35,067.00	$ 8,155.00	0.00490%	$ 768.00	52	$ 8,155.00	445
								$Q^* = \sqrt{\frac{2*D*S}{I*C}}$

Se puede usar la ilustración anterior como plantilla para aplicaciones tipo *Pull*, se encuentra en el CD adjunto bajo el nombre de Programa de CD 13 – Cantidades *Pull*.

Programa de CD 13 - Cantidades Pull

En todos los casos enunciados sobre definición y cálculo de la demanda o estimado, debe hacerse con la metodología de pronósticos (*Forecast*) bajo el uso de series temporales con Modelos AR.I.MA. y Clásicos (casos particulares de los Modernos o AR.I.MA.) (Mora, 2007c). El libro aporta un programa para calcular hasta 10000 referencias en simultáneo de tipo *Push* o *Pull*, en el Programa de CD 14 – Inventarios automático de 10000 Referencias.

Programa de CD 14 - Inventarios automático de 10000 Referencias

Los conceptos emitidos en el manejo y gestión de inventarios son básicos y solo pretenden ilustrar de una forma simple al lector o se puede recurrir a la bibliografía recomendada para ampliar temas y fundamentos (Ballou, Díaz, Árbones, Mora, entre otros), como a la amplia literatura universal que existe sobre este tópico.

5.6.4 Subcontratación

La utilización de otras personas o entidades para realizar actividades de gestión u operación de mantenimiento, es una opción siempre latente en las organizaciones, siempre y cuando se haga utilizando conceptos y metodologías de aceptación y validez universal puede ser una buena decisión.

La clasificación de herramienta avanzada de mantenimiento se basa en la utilización de dos conceptos fundamentales: la agregación de valor por parte del proveedor subcontratado y el análisis profundo de las actividades o procesos que se delegan bajo una metodología de elementos indiferenciados (o no) con mapas arquitectónicos estratégicos que permiten seleccionar de una manera técnico-económica las mejores alternativas.

Las industrias consideran la posibilidad de subcontratación de actividades reales o intelectuales inherentes a mantenimiento con recursos de terceros, al utilizar recursos de la compañía. El desligar funciones de mantenimiento sirve en ocasiones, como una excelente gestión para atender los picos de demanda, como también permite la flexibilización del mantenimiento en la empresa (Brewster, 1997).

La subcontratación está supeditada a una serie de criterios que la vuelven atractiva y adecuada, dentro de estos criterios resaltan:

- Precio
- Calidad
- Tiempos de entrega

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Secuencia histórica
- Elementos indiferenciados [237]
- Cultura interior
- Recursos y Talento Humano
- Ingeniería
- Control de gestión
- Tercerización intelectual

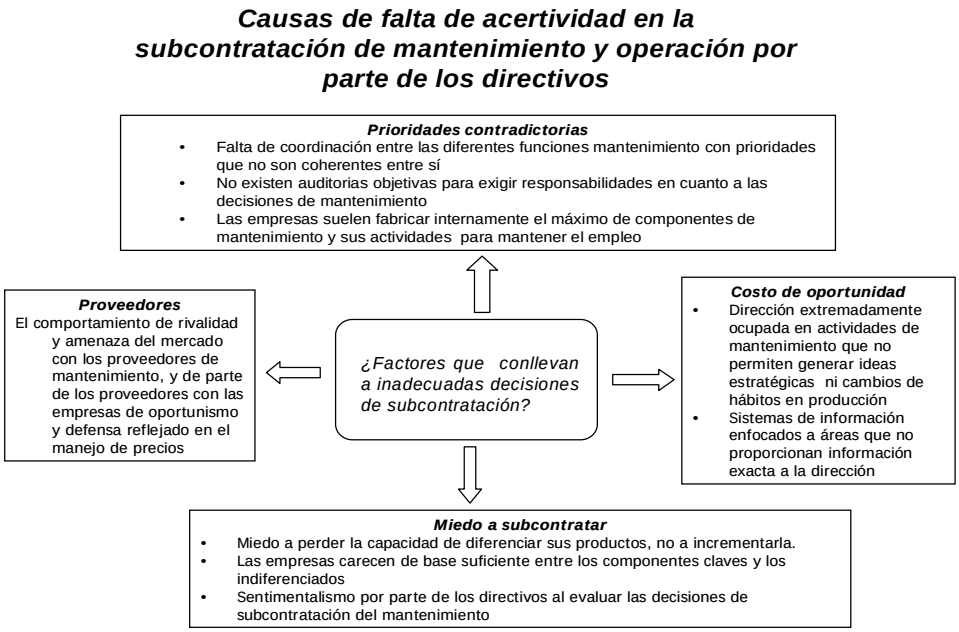
La decisión de hacer trabajos con otras empresas de servicio no puede basarse solo en el precio, son innumerables los factores que inciden de una forma estratégica en la subcontratación y que hace de esta una alternativa atractiva cuando se realiza en forma adecuada.

La subcontratación es una elección interesante cuando realmente contribuye en: costos, tiempos, valor agregado (para el cliente interno o externo), oportunidad, facilitación de actividades no diferenciadas de la empresa y en tecnología al mejor desempeño de las organizaciones (Venkatesan, 1992), al procurar evitar actividades que no le aportan ningún valor agregado a los productos o servicios prestados, o simplemente cuando hay entidades más competitivas que lo hacen mejor.
La idea clásica de que solo se deben subcontratar actividades o servicios de mantenimiento que sean indiferenciados (es decir que no afectan las funciones ni los procesos primarios de la empresa) está en revisión, esto genera mucho desgaste en la gestión interna de las organizaciones, en la actualidad las empresas líderes en el mundo subcontratan productos esenciales o medianamente indiferenciados.

Con el fin de aplicar la metodología de análisis de subcontratación basada en elementos indiferenciados o no, y mapas estratégicos se hace necesario definir los equipos, sistemas y subsistemas estratégicos de la operación, generación, transmisión o distribución que se realiza.

Esto implica profundos análisis del sistema y de cada uno de los componentes de la estructura de mantenimiento, de la metodología de producción y de la arquitectura de operación que se manejan en la empresa, de aquí y de la diferenciación (o ventaja competitiva) que se quiere mantener ante el cliente y la sociedad, se derivan entonces los trabajos y elementos susceptibles de delegar a proveedores en mantenimiento.

Ilustración 144 - Causas de falta de nivel de acierto en la subcontratación de mantenimiento



[237] *Indiferenciados son aquellos servicios, productos o procesos que no son esenciales en la misión de la empresa y que no aportan ningún valor agregado adicional o significativo en el mantenimiento, producción, operación o bien fina, y que normalmente otras empresas lo hacen mejor afuera.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 145 - Conceptos de arquitectura estratégica en servicios de mantenimiento

Conocimiento Arquitectónico del proveedor de mantenimiento

Es la capacidad de captar las exigencias y necesidades del cliente en mantenimiento, y de forma muy detallada y especializada, reproducirlas o traducirlas al lenguaje de las especificaciones en cuanto a prestaciones del subsistema.

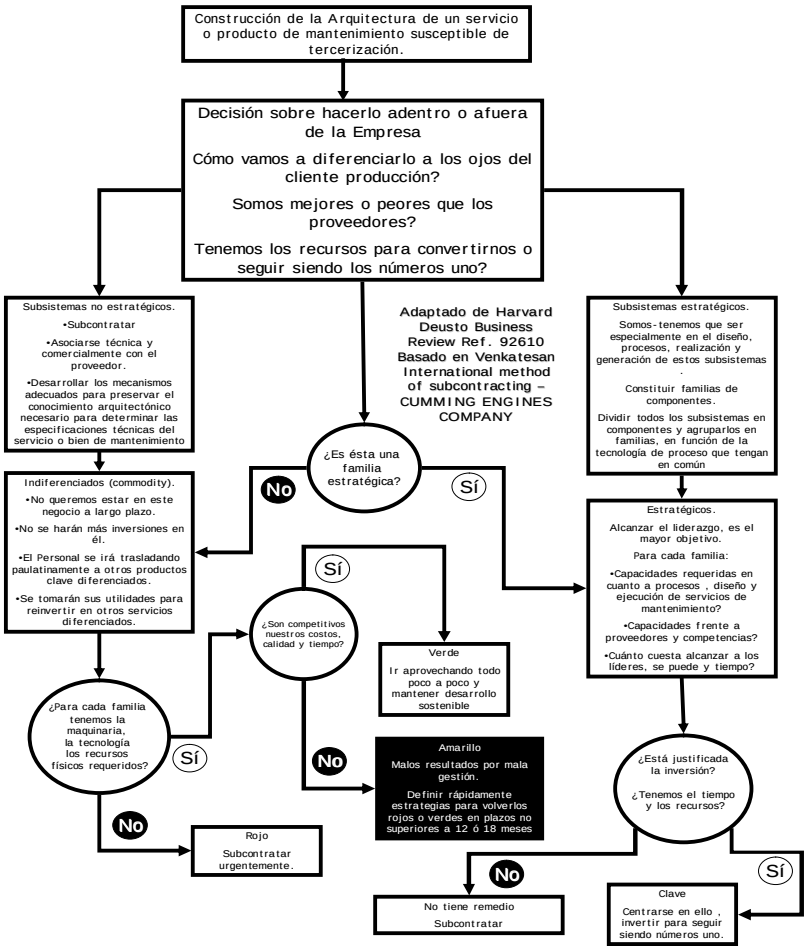
¿Cuándo un Subsistema es Estratégico? lo es, cuando tiene las siguientes características:

1. Atributos destacados del servicio de mantenimiento de acuerdo a la percepción del cliente
2. Capacidad de producción y diseños altamente especializados
3. Liderazgo tecnológico en bienes y servicios de mantenimiento
4. Comparación de las capacidades del proveedor en cuanto a diseño y producción con respecto a la empresa
5. Análisis de nivelación con los mejores proveedores

(Mora, 2007a)

La selección de los equipos claves y de sus componentes estratégicos se realiza con un grupo de análisis amplio, con suficiente representación tanto horizontal como vertical de la empresa, una vez se constituyen los mapas estratégicos de unidades y elementos diferenciados o no, se procede a establecer los procesos de decisión para la subcontratación de servicios de mantenimiento, mediante un proceso adecuado de selección, entrenamiento, evaluación y monitoreo de proveedores. El concepto fundamental para tercerear o subcontratar, es el grado de indiferenciación, éste a su vez se basa en el nivel tecnológico del bien o servicio de mantenimiento a subcontratar; para ello es necesario definir y entender los mapas estratégicos tecnológicos del área en particular de la empresa, su nivel, su atractivo y su influencia en el producto final. Es recomendable subcontratar cuando el proveedor es bien calificado y su tecnología es madura, básica y masiva, esto genera independencia y calidad; también es recomendable la delegación cuando se han perdido al interior de mantenimiento ventajas competitivas, o calidad o el precio se ha incrementado rotundamente, de ahí la ventaja de trabajar *LCC* en tiempo real.

Ilustración 146 - Proceso decisional integral de tercerización bajo enfoque internacional



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

En cuento a subcontratación se dejan en este libro los elementos básicos y fundamentales para llevar a cabo un proceso de *out-sourcing* bajo la metodología de valor agregado, elementos estratégicos y elementos indiferenciados.

5.6.5 Métodos de diagnóstico rápido y confiable en mantenimiento

Las auditorías, evaluaciones, diagnósticos y mediciones del área de mantenimiento son muy usuales en las empresas medianas y grandes (González, 2004), su forma de realización no es única ni estandarizada, pueden existir diversas formas, métodos y herramientas a tal fin, todos con sus bondades y limitaciones; se toman dos de las más usadas y recomendadas, por su gran acierto y facilidad de aplicación:

- Inglesa Flash Audit
- Americana de Método Jerárquico Analítico de componentes principales - *Eigen Value - Eigen Vector*

5.6.5.1 Flash Audit

Este modelo de diagnóstico utiliza los 12 criterios descritos en la Ilustración 9 - Objetivos del mejoramiento del programa Flash Audit y áreas que cubre:

Ilustración 147 - Áreas y tópicos que cubre y diagnostica el Flash Audit.

Área	Tópico	Número de preguntas por tópico	Número de preguntas por área	Porcentaje de preguntas que cubre
0 - Estado de la relación entre las áreas de mantenimiento y producción			34	8.81%
a)	Comunicación y relaciones	6		
b)	Métodos de intervención	9		
c)	Percepción del nivel de mantenimiento preventivo	11		
d)	Medición de la función de mantenimiento por el área de producción	8		
2 - Los niveles superiores como observan a mantenimiento			31	8.03%
a)	Posición de mantenimiento en la estructura y organigrama de la empresa	9		
b)	Ubicación del recurso humano y su mano de obra dentro de la empresa	7		
c)	Opinión sobre mantenimiento	8		
d)	Importancia que se da a los recursos financieros	7		
3 - Percepción interna y propia de mantenimiento			26	6.74%
a)	Importancia que se da a la organización en mantenimiento	10		
b)	Manejo, gestión y análisis de datos y registros en mantenimiento	8		
c)	Mantenimiento preventivo	8		
4 - Grado de disponibilidad de equipos			22	5.70%
a)	Sistema de registro e información histórica de mantenimiento y operación de equipos	12		
b)	Análisis y utilización de los datos de información y registros históricos	10		
5 - Conocimiento de los costos de mantenimiento.			20	5.18%
a)	Registro, análisis y utilización de los costos históricos de mantenimiento	13		
b)	Análisis de los costos presentes en mantenimiento	7		
6 - Métodos y preparación de las tareas de mantenimiento			66	17.10%
a)	Nivel de preparación de los trabajos de mantenimiento para el área de producción	12		
b)	Registro histórico de intervenciones y demandas de trabajos de mantenimiento	7		
c)	Análisis del sistema actual de planeación y preparación de tareas de mantenimiento	10		
d)	Planeación de los trabajos de mejoras y rediseños de equipos	7		
e)	Mantenimiento planeado, su planeación y preparación	9		
f)	Planeación y consecución de repuestos y piezas de recambio	10		
g)	Manejo de la documentación e información técnica	11		
7 - Planeación de las actividades de mantenimiento			23	5.96%
a)	Programación de las tareas de mantenimiento	13		
b)	Cronograma y ejecución de todas las actividades de mantenimiento	10		
8 - Manejo y gestión de inventarios.			56	14.51%
a)	Manejo en general de inventarios de repuestos e insumos de mantenimiento.	7		
b)	Sistema de información, registro, entradas, salidas, pedidos, stocks, etc. de los repuestos en inventario	10		
c)	Listado de repuestos	18		
d)	Gestión y manejo de repuestos	12		
e)	Compras, pedidos, proveedores, reposición de inventarios, etc. de los repuestos	9		
9 - Actividades y roles de los miembros del equipo de mantenimiento			29	7.51%
a)	En cuanto a mantenimiento	21		
b)	En relación a la seguridad	8		
10 - Manejo de Recursos Humanos en mantenimiento			34	8.81%
a)	Indicadores, tasas y rendimientos de la mano de obra física e intelectual	10		
b)	Gestión del recurso humano en mantenimiento y su mano de obra y utilización	9		
c)	Proporción de mano de obra preventiva, predictiva y correctiva en mantenimiento	4		
d)	Aspectos de productividad y motivación del personal de mantenimiento	11		
11 - Gestión y manejo de recursos físicos y materiales en mantenimiento			27	6.99%
a)	Documentación técnica	10		
b)	Utensilios, equipos y herramientas de mantenimiento	11		
c)	Infraestructura	6		
12 - Capacitación y entrenamiento en mantenimiento			18	4.66%
a)	Importancia del entrenamiento y de la capacitación en mantenimiento	18		

(Mora, 2007c)

La metodología de realización consiste en aplicar el instrumento de medida *Flash Audit* a 12 funcionarios de la empresa, distribuidos así: cuatro en mantenimiento, cuatro en producción (u operación) y cuatro personas de los mandos superiores de estas dos áreas o de áreas claves relacionadas con las dos anteriores.

Los archivos en Excel para realizar los instrumentos se denominan: Mantenimiento 1, Mantenimiento 2, Mantenimiento 3, Mantenimiento 4, Producción 1, Producción 2, Producción 3, Producción 4, Gerente 1, Gerente

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

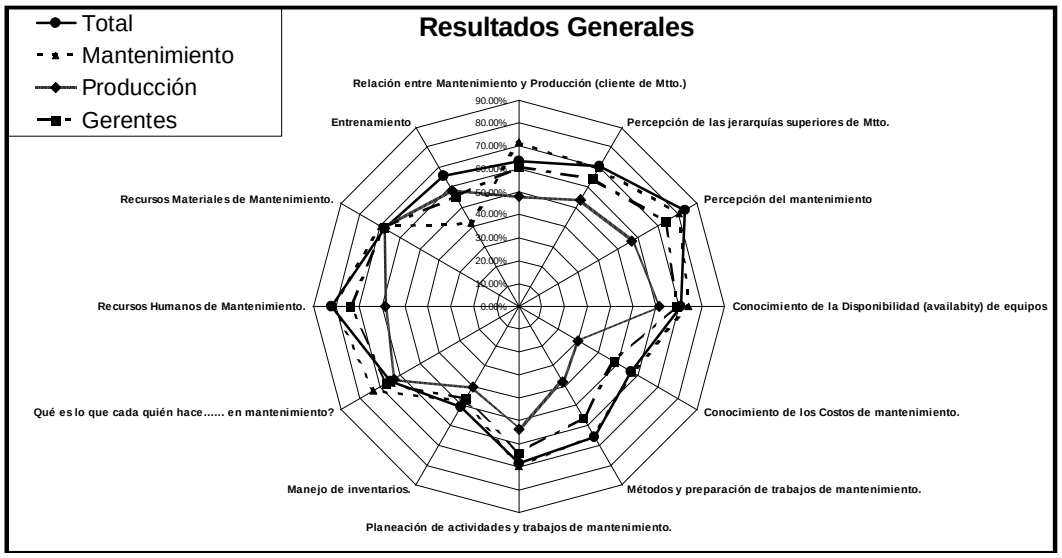
2, Gerente 3 y Gerente 4; se encuentran en el CD adjunto en el directorio Programa de CD 15 – Flash Audit, con versión en castellano y están disponibles también en inglés en el directorio del CD. La información se procesa con la macro Ya, que se encuentra en el recuadro izquierdo superior de color ladrillo de la primera Hoja Datos; cada instrumento se llena por separado y se almacena en el mismo directorio de la página de análisis total de los 12 archivos.

Programa de CD 15 - Flash Audit

Al terminar de procesar los resultados se obtienen en el mismo programa de la Hoja Final de resultados de los valores reales y por mejorar por grupo (mantenimiento, producción y gerentes), al igual que los totales por área; también se obtienen en forma gráfica en la Hoja Radar de resultados.

Ilustración 148 - Resultados del Flash Audit

		Gerentes		Mantenimiento		Producción		Total	
No.	Concepto	% Real G	por mejorar %	% Real M	por mejorar %	% Real P	por mejorar %	% Real Total	por mejorar %
1	Relación entre Mantenimiento y Producción (cliente de Mtto.)	63.24%	36.76%	71.32%	28.68%	47.79%	52.21%	60.78%	39.22%
2	Percepción de las jerarquías superiores de Mtto	70.16%	29.84%	69.35%	30.65%	53.23%	46.77%	64.25%	35.75%
3	Percepción del mantenimiento	83.65%	16.35%	80.77%	19.23%	56.73%	43.27%	73.72%	26.28%
4	Conocimiento de la Disponibilidad (availabity) de equipos	70.45%	29.55%	73.86%	26.14%	61.36%	38.64%	68.56%	31.44%
5	Conocimiento de los Costos de mantenimiento	56.25%	43.75%	57.50%	42.50%	30.00%	70.00%	47.92%	52.08%
6	Métodos y preparación de trabajos de mantenimiento	65.53%	34.47%	64.77%	35.23%	38.26%	61.74%	56.19%	43.81%
7	Planeación de actividades y trabajos de mantenimiento.	68.48%	31.52%	69.57%	30.43%	53.26%	46.74%	63.77%	36.23%
8	Manejo de inventarios	50.45%	49.55%	47.32%	52.68%	40.18%	59.82%	45.98%	54.02%
9	¿Qué es lo que cada quién hace... en mantenimiento?	64.66%	35.34%	73.28%	26.72%	62.93%	37.07%	66.95%	33.05%
10	Recursos Humanos de Mantenimiento	81.62%	18.38%	80.88%	19.12%	58.09%	41.91%	73.53%	26.47%
11	Recursos Materiales de Mantenimiento	67.59%	32.41%	69.44%	30.56%	67.59%	32.41%	68.21%	31.79%
12	Entrenamiento	65.28%	34.72%	41.67%	58.33%	58.33%	41.67%	55.09%	44.91%



El siguiente paso consiste en tomar las áreas más críticas para establecer los tópicos con menor calificación (esta se encuentra entre 1 y 3, con 1 como óptima y 3 como la más ineficiente[238]) y dentro de ellos se toman las preguntas (con sus temas) con menor evaluación, con el fin de priorizar los planes de mejoramiento, en esa dirección.

5.6.5.2 Método de diagnóstico Jerárquico Analítico de Componentes Principales - Eigen Vector

El modelo presenta la opción de evaluar diferentes aspectos y criterios de la gestión y operación del mantenimiento[239], a partir de la calificación de las distintas variables seleccionadas para evaluar por parte de los expertos del área (ingenieros, técnicos, administradores, empleados, analistas, trabajadores, proveedores, etc.[240]).

---

[238] *El programa informático en Excel, está diseñado que al tomar el evaluador la opción más positiva, asigna automáticamente una calificación de 1 y con la más negativa de 3, la opción intermedia otorga un valor de 2; todas las preguntas tienen tres opciones de evaluación en el Excel.*

[239] *Como de cualquier otra área o proceso en las empresas.*

[240] *Para que la muestra de evaluadores tenga valide estadística y representatividad, se debe recurrir al menos a treinta y un personas (Teorema del límite central ya descrito anteriormente) expertas de todos los niveles jerárquicos de mantenimiento, que tengan experiencia y conocimiento de los criterios a evaluar.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Las calificaciones siempre se hacen contra un objetivo deseado, y esta es la diferencia que tiene frente al modelo anterior *Flash Audit*, pues este el Jerárquico Analítico es cambiante al depender del objetivo o meta que se desea evaluar.

La calificación de las variables presenta dos dimensiones una que consiste en definir el peso relativo de la variable en la realización del objetivo seleccionado de mantenimiento y la otra que es la evaluación circunstancial de esa variable de mantenimiento en ese instante en la empresa frente a la meta propuesta, al conjugar los dos valores se obtiene mediante un procedimiento matemático, la evaluación de cada criterio para su peso relativo y su valor actual frente a la meta designada.

5.6.5.2.1 Desarrollo

El primer paso consiste en seleccionar los tópicos a evaluar, se sugiere para facilidad del método adoptar dos variables de cada uno de los ocho factores productivos descritos en la sección 5.4.4.6 . Factores productivos modernos (para mantenimiento y producción).

El conjunto total de dieciséis[241] elementos a jerarquizar y calificar, se puede seleccionar de la base de variables suministradas en el CD adjunto en el archivo Excel ubicado en Programa de CD 16 – Variables de factores productivos, donde se presenta una amplia lista de criterios posibles a medir; o en su defecto los evaluadores adoptan criterios propios.

Programa de CD 16 - Programa de CD 16 - Variables de factores productivos

Luego, como segundo paso se define la importancia que tiene cada criterio frente a cada uno de los demás, a la luz del objetivo descrito, con valores de importancia relativa que van desde 1 (baja) hasta 9 (alta) en números enteros, para lo cual se pude usar el Instrumento 1 de diagnóstico J A, en el CD adjunto.[242].
Programa de CD 17 - Instrumento 1 de diagnóstico J A

Para realizar esta calificación relativa se utiliza el siguiente recuadro para asignar los valores relativos.

Ilustración 149 - Tabla de calificaciones de importancia relativa entre criterios J A

Intensdidad de la importancia - Calificación	Definición	Explicación
1	Igual importancia importancia del criterio horizontal frente al vertical para alcanzar el objetivo propuesto	Dos actividades contribuyen igual al objetivo
3	Importancia débil del criterio horizontal frente al vertical para alcanazar la meta	Un criterio favorece ligeramente sobre el otro para el logro del objetivo
5	Importancia esencial o fuerte del objetivo horizontal sobre el vertical para relaizar el objetivo	Uncriterio favorece fuertemente sobre el otro para el logro del objetivo.
7	El criterio horizontal es mucho más importante que el vertical para lograr la meta	Un criterio es claramente más importante que el otro para el logro del objetivo
9	La variable horizontal es supremamente más importante que la variable vertical para alcanzar el logro del objetivo	Un criterio es máximo sobre el otro para el logro del objetivo
2,4,6 y 8.	Valores intermedios en sus rangos	Se necesita compromiso de ambas criterios

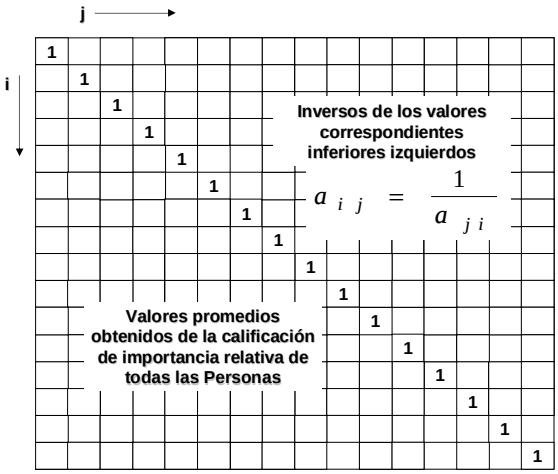
Posteriormente las 30 personas (o las que se puedan disponer) evalúan la importancia relativa de todos los criterios, se toman los promedios de todos las evaluaciones y se construye una matriz de n[243] criterios (filas) por n columnas, donde la diagonal que baja desde la izquierda en el nivel superior hacia la derecha en su parte inferior se constituye con valores de uno, izquierdo vertical de izquierda a derecha bajando se construye con valores absolutos de 1, la media matriz izquierda inferior se construye con los promedios de las calificaciones de

[241] *Se puede seleccionar otro número de variables, por ejemplo 14, 12, etc.*
[242] *Para esta parte del proceso se puede utilizar el Formato en el CD adjunto descrito como Instrumento 1 de diagnóstico J A en el CD en programas de CD.*
[243] *n es el número de criterios a evaluar en el diagnóstico de mantenimiento.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

importancia relativa asignada y la mitad superior izquierda se calcula con los inversos correspondientes a los valores anteriores, de tal forma que:

Ilustración 150 - Condicionantes de importancia relativa en J A



De esta forma se obtiene la matriz (de n columnas x n filas) de comparaciones de pares de criterios, la cual se somete al procedimiento matemático de componentes principales para obtener un vector de n componentes con los máximos valores característicos, este procedimiento se puede realizar con Softwares convencionales como Mat Lab, *Statgraphics*, DYANE 2 (Santesmases, 2003), *Mathematics* u otros, por medio del cual se obtiene el vector *eigen-vector* o característico.

El análisis por componentes principales es un acercamiento estadístico que se usa para analizar la relación entre un gran número de variables y explicarlas en términos de una dimensión común. El análisis estadístico involucra una forma de agrupar la información contenida en un número de variables que sea menor que la dimensión original, con una mínima pérdida de información importante (Hair, y otros, 2005). Es esencialmente descriptivo y tiene una interpretación geométrica, según Pearson, dada por el plano de mejor ajuste y vectores de máxima concentración en función de distancias euclidianas. Esta es una técnica de análisis factorial que revela las dimensiones o factores subyacentes en la asociación o relación existente entre los valores de las variables analizadas. Un factor es una combinación lineal de las variables originales, los cuales se representan geométricamente por ejes que son ortogonales, que implica que los factores son independientes pero correlacionados entre sí.

El método de componentes principales se basa en una transformación lineal de las observaciones originales, la cual es conocida en el álgebra vectorial como generación de valores y vectores propios. Las nuevas variables generadas se denominan componentes principales con características estadísticas como independencia y no correlación directa.

La transformación lineal que sintetiza la máxima variabilidad corresponde al máximo valor Lambda (λ). Por lo tanto la primera transformación lineal, o primera variable generada, o primer componente principal expresa la máxima variabilidad posible en el conjunto de datos.

La segunda transformación sintetiza la máxima variabilidad residual sujeta a la condición de no correlación con el primer componente principal. Greenberg en 1975, examina las propiedades de los estimadores generados y deduce que al incluir en el modelo los últimos componentes principales aumenta la varianza, pero si hay una elevada correlación de estos con las variables independientes disminuye el sesgo. Se compara el método de mínimos cuadrados con el de componentes principales y se concluye que en presencia de multicolinealidad, es preferible el segundo método para estimar los parámetros y seleccionar variables.

El soporte estadístico, matemático y demostrativo con fórmulas y deducciones del proceso de análisis estadísticos multivariables y de interdependencias como de componentes principales para hallar el vector característico se encuentra en varias publicaciones que se consiguen en el medio (Duffuaa, y otros, 1995) (Santesmases, 2003)(Grossman, 1999) (Hair, y otros, 2005).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

El procedimiento para obtener las evaluaciones individuales se puede realizar con el formato que se encuentra en el CD adjunto en la denominación Programa de CD 17 - Instrumento 1 de diagnóstico J A, para procesar los resultados y obtener la matriz característica se puede apoyar en el programa informático en Excel descrito en el CD adjunto como Método J A, en el Programa 18 de CD.

Programa de CD 18 - Método J A

El siguiente paso es calificar el estado actual de cada criterio en cuanto a su influencia para facilitar el alcance de la meta planteada, se realiza mediante una calificación 1 (mínima) a 9 (máxima influencia) con números enteros. Para esta evaluación se puede utilizar el formato Word establecido en el CD adjunto bajo el nombre de Instrumento 2 de *J A*, en el Programa de CD 19.

Programa de CD 19 - Instrumento 2 de J A

El último proceso es obtener la calificación total para cada criterio, esta se logra calcular al multiplicar el valor correspondiente del *eigen-vector* por la segunda calificación de influencia, con lo cual se obtienen los diferentes valores para cada criterio, se organizan de mayor a menor con el fin de darles prioridad en la aplicación de estrategias y mejoramiento continuo a los primeros con mayor valor. Para procesar las segundas calificaciones y los resultados integrales de estrategia y mejoramiento se puede recurrir al programa Resultados generales J A, en Excel en el CD adjunto bajo el nombre Programa de CD 20.

Programa de CD 20 - Resultados generales J A

Ejemplo 38 - Ejemplo de diagnóstico Jerarquía Analítica

Los criterios a evaluar frente al objetivo de reducir los costos de mantenimiento en una empresa, al ser evaluados en forma relativa entre ellos en una empresa, otorga la siguiente matriz característica de comparaciones de resultados[244].

	Importancia del criterio horizontal frente al vertical para le logro del objetivo (favor evalúe de 1 a 10, cifra entera).															
Criterio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 - Organización y personal.	1.00	0.19	0.20	0.19	0.19	0.19	0.18	0.13	0.20	0.18	0.18	0.16	0.21	0.18	0.17	0.17
2 - Productividad de la mano de obra.	5.17	1.00	0.20	0.18	0.17	0.18	0.21	0.18	0.17	0.18	0.19	0.16	0.19	0.19	0.20	0.21
3 - Capacitación gerencial.	4.90	4.97	1.00	0.18	0.15	0.18	0.21	0.16	0.22	0.19	0.21	0.15	0.22	0.21	0.18	0.19
4 - Capacitación de planificadores.	5.23	5.57	5.50	1.00	0.19	0.19	0.19	0.22	0.18	0.20	0.23	0.21	0.19	0.21	0.16	0.24
5 - Capacitación de los técnicos.	5.60	5.73	6.47	5.33	1.00	0.19	0.18	0.17	0.19	0.19	0.16	0.19	0.22	0.20	0.20	0.20
6 - Motivación.	5.83	5.67	5.57	5.30	5.33	1.00	0.22	0.19	0.19	0.20	0.17	0.21	0.19	0.11	0.18	0.17
7 - Administración y control del presupuesto y costos.	5.63	4.87	4.80	5.23	5.50	4.63	1.00	0.23	0.16	0.19	0.14	0.16	0.18	0.18	0.19	0.23
8 - Planeación y programación de órdenes de trabajo.	8.00	5.50	6.07	4.50	5.93	5.13	4.43	1.00	0.19	0.18	0.17	0.19	0.19	0.19	0.20	0.17
9 - Instalaciones.	5.10	5.90	4.53	5.60	5.37	5.30	6.07	5.23	1.00	0.20	0.16	0.18	0.17	0.17	0.17	0.19
10 - Control de almacenes, materiales y herramientas.	5.63	5.43	5.30	5.03	5.13	5.10	5.37	5.47	4.93	1.00	0.19	0.21	0.19	0.19	0.20	0.19
11 - Mantenimiento preventivo e historia del equipo.	5.60	5.27	4.87	4.37	6.13	5.93	7.03	5.97	6.13	5.17	1.00	0.19	0.17	0.19	0.20	0.17
12 - Ingeniería y monitoreo de las condiciones.	6.17	6.40	6.63	4.77	5.27	4.83	6.13	5.40	5.60	4.70	5.20	1.00	0.22	0.21	0.20	0.16
13 - Medición del trabajo e incentivos.	4.80	5.13	4.63	5.17	4.47	5.30	5.57	5.23	5.83	5.40	5.93	4.60	1.00	0.19	0.22	0.17
14 - Sistemas de información	5.70	5.17	4.70	4.67	5.03	9.00	5.57	5.13	5.80	5.13	5.23	4.87	5.17	1.00	0.22	0.19
15 - Manejo de inventarios y repuestos	5.90	5.00	5.50	6.27	4.93	5.43	5.27	5.10	5.93	5.07	4.93	5.03	4.63	4.53	1.00	0.21
16 - Optimización de costos	5.77	4.77	5.37	4.20	4.90	5.97	4.37	5.97	5.33	5.27	5.77	6.20	5.87	5.37	4.80	1.00

(Mora, 2007b)

Al procesar la matriz de comparaciones y obtener su vector característico[245] (*eigen-vector*) se puede pasar a la segunda evaluación mediante el Instrumento 2[246], en el cual se obtiene la valoración del estado actual, la cual en el caso particular que se lleva a cabo aporta los resultados que se muestran a continuación. Posteriormente con el *eigen-vector* multiplicado con los resultados promedios de la evaluación de cada criterio del estado actual, se obtiene la valoración final de todos los criterios a la luz del objetivo propuesto, si se ejecuta la macro Ya que se encuentra en el Programa de CD 20 - Resultados generales J A, en su Hoja Coloque acá el Eigenvector. Para procesar la segunda evaluación y los resultados finales, se obtiene la jerarquización de los diferentes criterios a mejorar en su orden de importancia.

---

[244] *Matriz que se obtiene del instrumento del CD en Programa de CD 18 – Método J A, en su Hoja Promedio general.*

[245] *Para el caso particular del software Mat Lab, se dan unas instrucciones básicas de ayuda en el CD adjunto bajo el archivo denominado como Programa de CD 21 – Proceso J A de Matrices en Mat Lab*

[246] *Véase en el CD adjunto en Instrumento 2 de J A, en el Programa de CD 19 - Instrumento 2 de J A.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Programa de CD 21 - Proceso J A de Matrices Eigen vector en Mat Lab

Vector característico (*eigen-vector*).

Factor	Peso relativo
Criterio 1	0.0241
Criterio 2	0.0313
Criterio 3	0.0378
Criterio 4	0.0497
Criterio 5	0.0623
Criterio 6	0.0727
Criterio 7	0.0868
Criterio 8	0.1097

Factor	Peso relativo
Criterio 8	0.1097
Criterio 9	0.1365
Criterio 10	0.1646
Criterio 11	0.2200
Criterio 12	0.2574
Criterio 13	0.3129
Criterio 14	0.3909
Criterio 15	0.4506
Criterio 16	0.5930

La calificación del instrumento dos del estado actual aporta los siguientes resultados

	Calificacion	Persona																														
	Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Promedio
1	Organización y personal	8	1	3	3	1	3	6	4	8	3	7	3	5	3	8	6	2	3	4	2	3	6	7	7	9	2	6	6	7	5	4.700000
2	Productividad de la mano de obra	6	1	3	2	2	6	1	6	4	7	8	1	9	2	8	5	7	2	1	2	7	3	1	4	4	7	8	2	1	3	4.100000
3	Capacitación gerencial	6	1	9	6	7	2	6	6	6	2	7	3	8	3	4	5	2	4	6	7	2	7	4	8	6	8	5	1	4	4	4.966667
4	Capacitación de planificadores	2	7	5	8	5	1	9	8	7	1	6	2	9	2	4	6	5	9	5	4	5	9	9	8	2	8	4	4	1	9	5.466667
5	Capacitación de los técnicos	1	1	3	9	4	1	9	3	2	4	9	1	1	6	8	6	6	9	6	6	6	1	1	4	4	2	8	6	4	4	4.500000
6	Motivación.	2	7	6	5	9	5	4	5	3	8	3	3	8	2	3	4	9	4	4	1	9	5	6	4	6	2	7	5	8	1	4.933333
7	Adminsitración y control del presupuesto	4	1	4	7	8	2	8	1	7	9	2	9	8	2	9	1	7	7	4	4	3	9	1	5	4	4	7	3	5	9	5.133333
8	Planeación y programación de órdenes de trabajo	9	3	3	4	6	7	9	6	6	7	5	8	1	6	7	3	4	3	7	6	2	8	4	9	4	6	8	5	3	5	5.466667
9	Instalaciones	6	8	2	1	3	9	3	2	4	8	5	9	9	1	6	8	2	1	6	7	6	9	7	7	6	2	9	3	9	5	5.433333
10	Control de almacenes, materiales y herramientas	4	9	7	8	9	6	9	8	9	3	8	7	6	6	7	8	3	1	3	1	3	2	1	6	7	9	7	8	3	7	5.833333
11	Mantenimiento preventivo e historia del equipo	1	2	2	3	5	1	9	1	3	3	7	6	3	1	1	6	2	4	4	8	4	1	2	6	2	8	7	7	3	6	3.933333
12	Ingeniería y monitoreo de las condiciones	7	7	3	6	1	2	7	1	2	9	5	5	9	1	7	2	6	2	6	3	3	9	8	1	6	5	3	2	1	5	4.466667
13	Medición del trabajo e incentivos	8	3	1	5	1	7	1	3	4	6	6	6	7	4	9	4	1	1	5	9	3	1	2	9	7	7	4	5	8	3	4.666667
14	Sistemas de información	1	5	7	8	2	8	1	7	9	2	9	8	2	9	1	7	7	4	6	6	6	6	6	6	6	6	1	1	4	4	5.166667
15	Manejo de inventarios y repuestos	3	9	4	6	7	9	6	6	7	5	8	1	6	7	3	4	3	7	4	1	9	4	1	4	1	9	5	6	4	6	5.166667
16	Optimización de costos	4	7	1	1	1	5	7	1	4	7	6	9	8	5	9	6	1	2	5	3	8	9	3	3	2	3	1	7	8	9	4.833333

Y se obtiene el valor total de cada criterio, mediante la multiplicación del vector característico por el promedio de estado actual del criterio.

No.	Area	Valor	Puesto
16	Optimización de costos	287	1
15	Manejo de inventarios y repuestos	233	2
14	Sistemas de información	202	3
13	Medición del trabajo e incentivos	146	4
12	Ingeniería y monitoreo de las condiciones	115	5
10	Control de almacenes, materiales y herramientas	96	6
11	Mantenimiento preventivo e historia del equipo	87	7
9	Instalaciones.	74	8
8	Planeación y programación de órdenes de trabajo	60	9
7	Adminsitración y control del presupuesto	45	10
6	Motivación	36	11
5	Capacitación de los técnicos	28	12
4	Capacitación de planificadores	27	13
3	Capacitación gerencial	19	14
2	Productividad de la mano de obra	13	15
1	Organización y personal	11	16

Al ejecutar la macro y ordenar los criterios en el orden en que se deben mejorar, muestra el proceso a seguir para emprender las estrategias en orden secuencial sobre los criterios que permitan disminuir los costos de mantenimiento. Los procesos de mejora continua se realizan en el orden de la columna puesto.

5.7 Instrumentos avanzados específicos de orden técnico, en mantenimiento

La cantidad de alternativas que se pueden usar en el campo técnico y administrativo de mantenimiento es amplia y diversa; a continuación se listan algunas de estas metodologías que tienen gran aplicación y gran difusión en el medio internacional. No es el ánimo del autor profundizar en ellas, sino mencionarlas, ya que de ellas se encuentra gran cantidad de literatura, folletos, catálogos y aplicaciones comerciales e industriales en el ámbito mundial en varios idiomas.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

5.7.1 Instrumentos avanzados técnicos específicos

Existen diversos métodos útiles en casos generales y otros que sólo se utilizan en situaciones especiales y particulares, se presentan a continuación los más renombrados:

5.7.1.1 Inspección visual, acústica y al tacto de componentes

La permanente vigilancia durante la operación o el mantenimiento de máquinas, juega un rol importante en los instrumentos avanzados para detectar fallas o condiciones fuera del estándar. La presencia visual de desgastes, situaciones anormales y ruidos indican que se está ante la presencia de un generador de falla, que puede evitarse tomarse las acciones correspondientes. (Kelly, y otros, 1998).

5.7.1.2 Vigilancia de temperaturas

La utilización de aparatos térmicos para el control y vigilancia de variables de condición en las máquinas es una herramienta avanzada muy útil en la detección potencial de fallas y situaciones fuera de estándar, entre ellos sobresalen: termómetros, termistores, pinturas, polvos térmicos, termóstatos, cámaras de rayos infrarrojos, sensores de temperatura, sensores de contacto, sensores basados en dilatación o expansión de líquidos, sensores bimetálicos en expansión, termopares, termocuplas, termorresistencias, testigos de color, bolas (*pellets*),sensores sin contacto, pirómetros ópticos y de radiación, cámaras infrarrojas, etc.

Algunas de las fallas que se pueden evidenciar con el control de temperatura son: daños en rodamientos, defectos en sistemas de refrigeración, sistemas de generación de calor o manejo energético, depósitos y sedimentos de materiales no deseados, daños en aislamientos, condiciones no estándares en sistemas eléctricos, etc. (Dounce, 1998) (Kelly, y otros, 1998).

5.7.1.3 Control de la corrosión

Mediante instrumentos eléctricos, mecánicos o productos químicos se puede evaluar el estado y la velocidad de corrosión o desgaste en los elementos, sistemas o máquinas. Entre las diferentes pruebas se señalan algunas como: probetas, ultrasonido, láser de pulsos, etc. (Sourís, 1992) (Kelly, y otros, 1998).

5.7.1.4 Resistencia eléctrica

La presencia de una grieta en un sistema de medición y prueba eléctrico aumenta la resistencia medida entre dos probetas en contacto con el material que se estudia, en cuanto a la presencia de fisuras (Mora, 2007a).

5.7.1.5 Lubricación, engrase y aceites

La reducción de la fricción y del desgaste en las máquinas, la eliminación del calor y el arrastre de impurezas son algunos de los beneficios que tiene un adecuado manejo y operación logística de lubricantes, aceites y grasas en la función de mantenimiento y operación en las empresas. La tribología es una ciencia que apoya el desarrollo de planes preventivos sobre las formas de evitar la fricción y el desgaste. Entre los tipos de fricción, aparecen: deslizante, giratoria o rodante, fluida, etc. Entre los tipos de lubricantes se pueden mencionar de acuerdo a su origen: animales, vegetales, minerales, sintéticos, etc. De acuerdo a la consistencia y su densidad, los lubricantes se pueden clasificar en: líquidos, semisólidos y sólidos. Entre las características más relevantes de los lubricantes sobresalen: viscosidad, punto de inflamación, punto de combustión, punto de goteo, resistencia a la oxidación, resistencia a la emulsificación, etc.

Programa de CD 22 - Desgaste y Análisis de Fallas aportado por Dr. L. E. Benítez - Universidad Nacional de Colombia Bogotá

Entre los aditivos que se le agregan para mejorar sus propiedades físicas, mecánicas, químicas, etc., sobresalen: antidesgaste, detergentes, inhibidores de corrosión, antiespumantes, emulsificadores, inhibidores de corrosión,

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

separadores de emulsiones, para mejorar el punto de goteo, para presiones extremas, para condiciones exigentes y específicas, etc. Entre los parámetros ambientales a tener en cuenta en los lubricantes, están: temperaturas de trabajo, presiones a que son sometidos, velocidades de funcionamiento y el medio ambiente donde se encuentran en operación. Entre las pruebas más solicitadas y utilizadas, sobresalen: residuos depositados (filtros, colectores magnéticos), residuos en suspensión (análisis del aceite con espectrómetro y análisis ferrográfico) y estado general del aceite en uso (espuma, emulsión, color, demás variables físico-químicas del lubricante) (Dounce, 1998) (Kelly, y otros, 1998).

5.7.1.6 Monitoreo de causas y efectos eléctricos

Los métodos de monitoreo eléctrico se fundamentan en un circuito eléctrico simple que mide el grado de corrosión de elementos o sistemas, utiliza diferentes metodologías, entre ellas se menciona la del método de polarización electroquímica de un recipiente con un líquido corrosivo; hay otra como la de los generadores de voltaje para evaluar motores o generadores, etc. (Duffuaa, y otros, 1995).

5.7.1.7 Termografía infrarroja

Por medio de esta herramienta avanzada se puede medir la temperatura superficial mediante la evaluación de radiación infrarroja. Se utiliza en una amplia gama de máquinas y sistemas, como: instalaciones eléctricas, calderas, refractarios, turbinas, etc. Trabaja mediante la medición de las variaciones de gradientes de temperatura sobre las máquinas y elementos en estudio, puede funcionar en blanco y negro o a color, mediante su interpretación gráfica y numérica se obtiene importantes análisis que contribuyen en la toma de decisiones en mantenimiento. La generación de calor puede tener su origen en sistemas mecánicos, eléctricos o térmicos. Utiliza cartas térmicas artificiales para su análisis e interpretación, mediante análisis absoluto o por comparación con estándares normales (Sourís, 1992) (Duffuaa, y otros, 1995).

5.7.1.8 Análisis de vibraciones

El establecimiento de patrones en condiciones normales de operación, permite diferenciar de situaciones fuera del estándar, esto se logra como una de las metodologías más certeras en el diagnóstico y monitoreo de equipos y elementos, a través de las vibraciones. Detecta defectos internos como: desalineaciones de rodamientos y poleas, desequilibrios dinámicos, desgastes de engranajes, sobrecargas, ejes defectuosos, etc. Las vibraciones se pueden definir como el movimiento de una masa desde un punto de reposo a lo largo de todas las posiciones y de regreso al punto de reposo, en donde está lista la máquina para repetir el ciclo. Entre los parámetros relevantes de vibraciones están: severidad de la vibración, espectros, situaciones de movimiento, velocidades pico, banda octava, desviaciones en las frecuencias de vibraciones, aceleración pico, espectros de frecuencias, ángulos de fase, banda amplias y estrechas, etc. Su utilidad es muy alta en el monitoreo y diagnóstico de equipos de rotación (Sourís, 1992) (Duffuaa, y otros, 1995) (Kelly, y otros, 1998) (Vibraciones@, 2008).

La puesta en marcha de un sistema de vigilancia en vibraciones se puede realizar en tres fases:

- Medición de los niveles de vibración con un sistema de medición portátil o con sonido, cuyo propósito es determinar varios valores iniciales (análisis de signatura, definición de los puntos a muestrear y registro de resultados previos).

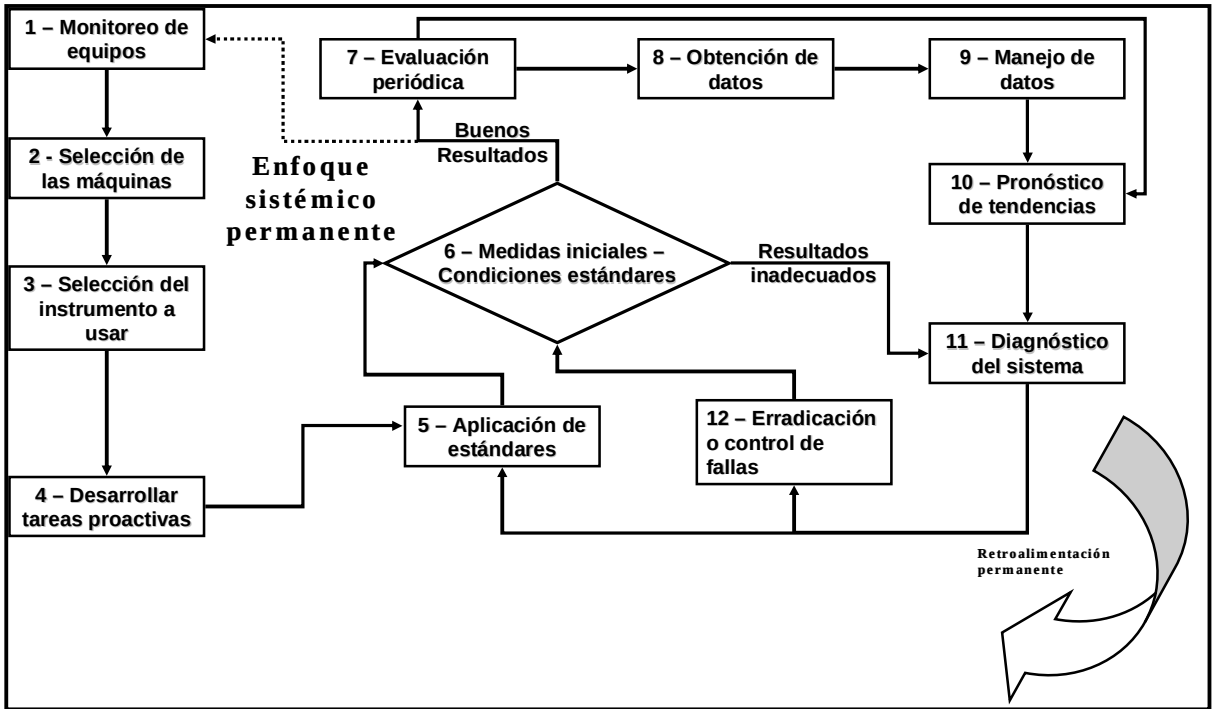
- Análisis del comportamiento de frecuencia mediante filtración de banda para erradicar incidentes no deseados o parásitos.

- Vigilancia permanente con la aplicación de sistema de análisis integral y monitoreo en tiempo real.

Uno de los ensayos más comunes en máquinas de rotación es el *Run-Down*, el cual revela mucha información, se realiza cuando se empieza a reducir la velocidad antes de una parada total y que tiene la particularidad de de generar el efecto de amplificación de las vibraciones cuando el sistema entra en resonancia (Vibraciones@, 2008) (Kelly, y otros, 1998) (Navarro, y otros, 1997).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 151 - Sistema de monitoreo y chequeo permanente con vibraciones



(Mora, 2007a)

5.7.1.9 Ferrografía - Análisis de lubricantes - Análisis espectrométrico – Cromatografía

El análisis permanente de los aceites permite el uso de diferentes técnicas que se aplican para determinar su composición química, y deducir por ende los parámetros de funcionamiento, materiales extraños y sus anormalidades. La ferrografía y la detección de partículas como de virutas magnéticas revisan las partículas de desgaste de materiales en movimiento de base de material de hierro que se encuentran en los aceites, esto permite monitorear y diagnosticar sobre los elementos en movimiento.

El análisis espectrométrico mide la presencia y la cantidad de contaminantes en el aceite, el espectrómetro de emisión atómica o absorción sirven para estas pruebas, que detectan la presencia de metales ferrosos y no ferrosos, como de partículas no metálicas. La cromatografía evalúa los cambios en las propiedades de los lubricantes, como pH, presencia de agua, viscosidad, punto de inflamación, fracción insoluble de agua, etc. mediante la absorción y los análisis específicos (Duffuaa, y otros, 1995).

5.7.1.10 Líquidos penetrantes

Los líquidos penetrantes y de tintas líquidas son usados para detectar grietas, superficies escalonadas o fisuras en los elementos provocadas por desgaste, fatiga, mantenimientos y reparaciones inadecuadas, corrosión, agentes atmosféricos, entre otros.

Eventualmente la detección de fugas o grietas en las máquinas al utilizar como medio de contraste líquidos jabonosos se puede considerar como una prueba sencilla de líquidos penetrantes. Es una técnica bien difundida, económica y efectiva (Duffuaa, y otros, 1995) (Sourís, 1992) (Kelly, y otros, 1998) (Mora, 2007b). Fisuras hasta de 0.25µm se pueden observar a simple vista, otras más finas se detectan con instrumentos más especializados[247].

[247] *Lo describe la norma británica BS 3889 Methods for Non-destructive Testing of Pipes and Tube - BSI - Londres - Inglaterra - 1968.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

5.7.1.11 Ensayo de pulverizado de partículas magnéticas

Al inducir un campo magnético en la superficie donde existe una fisura, mediante una inducción localizada de superficie con imanes tipo U; hace que el polvo magnético se focalice alrededor de la grieta (Kelly, y otros, 1998).

5.7.1.12 Ultrasonido

Se las emplea para detectar fallas, grietas, soldaduras deficientes, huecos, corrosiones, desgastes, anormalidades, roturas en elementos tales como: estructuras, ejes, tuberías, etc.; el método consiste en lanzar pulsos u ondas de ultrasonido al interior de los materiales y con las respuestas obtenidas al regreso de la señal determina la ubicación física y la criticidad de la falla.

El tiempo de retraso entre la generación del pulso del sonido y la detección de la reflexión genera una medida de la distancia de la fuente a la superficie. La propagación de ultrasonidos de banda de frecuencias entre 0.25 y 10 MHZ es bastante direccional y permite estudiar diferentes fisuras en la dirección en que ocurren o que se presume que existen. En aceros actúan adecuadamente en espesores entre 0.5 y 300 milímetros (Sourís, 1992)(Duffuaa, y otros, 1995) (Kelly, y otros, 1998).

5.7.1.13 Ensayos y controles no destructivos.

Clasifican en esta categoría de instrumentos avanzados de mantenimiento: la gammagrafía, rayos X, radiografías, las fibras ópticas para exámenes de profundidad, el ultrasonido, los procedimientos ópticos, los tratamientos de imagen, la Termografía infrarroja, ensayos bajo control, pruebas de aceleración de vida útil, etc. (Sourís, 1992)(Duffuaa, y otros, 1995) (Kelly, y otros, 1998).

5.7.1.14 Control de ruido

La constante revisión y medición de ruidos permite detectar en forma temprana las fallas o percibir elementos fuera de condiciones estándar; el sistema se fundamenta en medir las características de ruido bajo condiciones normales y poder usar esta referencia para detectar anomalías. Puede usarse como un método previo a un análisis más profundo de vibraciones (Sourís, 1992)(Duffuaa, y otros, 1995) (Kelly, y otros, 1998).

5.7.1.15 Filtros magnéticos

Se usan para el control del estado de los lubricantes, se colocan a la salida de los sistemas y unidades automáticas de lubricación, mediante el chequeo del estado del aceite y de la presencia de partículas permite diagnosticar la presencia de fallas o de pérdidas de las condiciones estándar de los sistemas o máquinas (Kelly, y otros, 1998) (Sourís, 1992)(Duffuaa, y otros, 1995).

5.7.1.16 Corrientes inducidas

La circulación de corriente eléctrica por una bobina que se coloca cerca de la superficie que se evalúa (en cuanto a desgastes o presencia de grietas) induce corrientes de Foucoult en el elemento. Las corrientes son detectadas por cambios en la inductancia de la bobina generadora o de la otra bobina correspondiente al ensayo (Kelly, y otros, 1998).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 152 - Algunas características de diferentes instrumentos avanzados técnicos de mantenimiento

Método	Subdivisión del método	Estado de la máquina		Esepcificación de la avería de la falla	Habilidades del Personal	Condiciones complementarias
		Parada	Operación			
Por sentidos de visión, tacto o auditivo		x		Superficie	Alta Experiencia	Amplio rango de métodos
			x	Componentes internos o exterior del equipo	Baja experiencia	Revisiones periódicas y usada especialmente en motores de aviones
Térmicos			x	Superficial o interna	Variadas	Usa diferentes instrumentos: desde termómetros hasta escáner infrarrojos
Tribológicos - Revisión			x	Sistemas lubricados como medio de extracción magnética, filtro o muestra evaluativa de aceite	Entrenamiento para diferenciar entre partículas normales y de materiales por desgarre	Análisis espectrométrico y espectrográfico o de ferrogarfía para definir elementos extraños en la muestra
Fugas		x	x	Diversos elementos sometidos a presión interna	Entrenamiento previo en el medio usado	Ninguna
Detección de grietas	Líquidos penetrantes *	x	x	Superficies planas, rugosas, etc. pero limpias	Entrenamiento básico y baja experiencia	Muestra solo grietas que afloran en la superficie exterior
	Partículas magnéticas *	x	x	Cerca de superficies planas, lisas y limpias	Entrenamiento básico y baja experiencia, capaz de percibir fisuras	Solo sirve para materiales magnéticos, es muy preciso para orientar la dirección vectorial de las grietas
	Resistencia eléctrica	x	x	Superficies planas y limpias, sin rugosidades fuertes	Entrenamiento básico y baja experiencia	Sirve para orientar la dirección vectorial de las grietas. Muy utilizado para medir profundidad de las fisuras
	Corrientes inducidas *	x	x	Superficies exteriores o cerca de ella. La distancia de la sonda a la grieta afecta los resultados	Alta experiencia y entrenamiento medio especializado	Sirve para encontrar un amplio rango de discontinuidades de los materiales, elementos, grietas, fuerzas, esfuerzos, tensiones superficiales, durezas, temples, etc.
	Ultrasonidos	x	x	Requiere acceso a una superficie plana y limpia, sin rugosidades fuertes	Para fisuras ocultas se requiere una alta experiencia y un entrenamiento medio especializado. En otras grietas visibles no requiere tanto	Sirve como estudio complementario a otras técnicas
	Radiografía	x	x	Debe ser posible accesar por ambos lados	Entrenamiento avanzado y alta experiencia en realización, lectura y análisis de radiografías, con alta capacidad de diagnóstico a partir de resultados	Se recomienda en superficies hasta de 50 milímetros en acero. Requiere de tener en cuenta la seguridad por exposición a la radiación. Sirve para grandes áreas de chequeo y estudio
Análisis de vibraciones	Espectro de frecuencia, o pico a pico	x	x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Entrenamiento acorde al caso y a la criticidad de la falla o de la evaluación, la experiencia y el conocimiento depende de los elementos y las circunstancias a analizar	Permite tomar medidas en tiempos cortos durante la operación. Monitorea situaciones permanentemente. Va desde medidas sencillas hasta casos complejos y difíciles
Corrosión	Corrosímetro. Elementos eléctricos		x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Entrenamiento medio y alguna experiencia básica	Mide 1µm de pérdida de corrosión
	Resistencia de polarización y potencial de corrosión		x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Entrenamiento medio y alguna experiencia básica	Únicamente manifiesta si ocurre la corrosión, su valoración es débil
	Probeta de hidrógeno		x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	No requiere ninguna práctica	El hidrógeno penetra y se esparce en las paredes delgadas de la sonda, lo que provoca aumento de presión
	Perforaciones con taladros		x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Necesita saber la precisión de hasta donde se debe taladrar	Mide en qué momento se llega a la cantidad de corrosión previamente fijada
	Probetas de corrosión	x	x	Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Entrenamiento bajo y poca experiencia, sólo lo básico para el manejo de probetas	Se comprueba cuando la planta se detiene
	Ultrasonidos	x		Ductos, tubos o recipientes, elementos especiales	Para fisuras ocultas se requiere una alta experiencia y un entrenamiento medio especializado. En otras grietas visibles no requiere tanto	Es capaz de percibir 0.5 milímetros de pérdida de espesor e incluso menos

(Mora, 2007b)

5.7.2 Técnicas de control y monitoreo de condición de estado.

Los instrumentos de medición especial o denominados de mantenimiento específico, se clasifican según si se pueden usar durante la operación de los sistemas o cuando estos están detenidos. Las diferentes técnicas de

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

control y monitoreo de equipos[248], variables y condiciones son descritas en párrafos anteriores, su utilización va condicionada a las circunstancias técnicas y económicas de cada caso. De las técnicas de control descritas, se pueden enunciar tres de ellas como de aplicación general: térmica, tribológica y de vibraciones.

Ilustración 153 - Comparación de tres instrumentos avanzados específicos técnicos de técnicas de control

Modelos generales de técnicas de instrumentos avanzados específicos de orden técnico particular y genérico

	Implementación sistémica, metódica y constante bajo la forma de tareas proactivas permanentes o alguna táctica avanzada		
Elementos de control	**Estudios y vigilancia Térmicos**	**Monitoreo tribológico**	**Vigilancia con Vibraciones**
Medio para la transmisión de información a través de la máquina	**Objetos o elementos sólidos o fluido, que posea conductividad térmica**	**Aceites lubricantes o de refrigeración, grasas u otro fluido con características medibles**	**Elementos sólidos Están en función de las características elásticas y másicas de los sólidos**
Elementos vigilados y monitoreados	**Elementos o sistemas que desprendan calor por movimiento físico o transmisión de energía. Sistemas térmicos con fluido para transferir calor. Intercambiadores**	**Cualquier componente que esté lubricado: cojinetes, componentes de transmisión (engranajes, acoples, levas, ejes), bomba de lubricación, etc.**	**Elementos, componente o máquinas con movimiento independiente o relativo entre las partes**
Averías encontradas	**Averías en sistemas, daños en mecanismos, bloqueo de contactos, fugas de calor, contaminación de líquidos refrigerantes, Excesos de carga en equipos estándares y convencionales**	**Daños, averías, fugas, grietas, etc. o cualquier otro tipo de deterioro puntual o progresivo del sistema. Características de materiales, de desgaste, de aceites o fugas en los sistemas lubricados**	**Elementos de reposición de elementos o materiales en movimiento, formas de desgaste en materiales por fricción.** **Elementos de rotación, ejes o flechas**
Máquinas de vigilancia y monitoreo	**Termocuplas, termómetros de fluidos o bimetálicos, termopares, termorresistencias, termistores, instrumentos asociados, registros de temperaturas, infrarrojos, aparatos ópticos, cámara de infrarrojos, etc.**	**Elementos o filtros cambiables en carga, clavijas magnéticas para el examen visual de restos utilizando microscopio, espectrómetro para análisis de material en suspensión, ferrógrafo para separación de residuos, medida de presión**	**Acelerómetro más equipos electrónicos de proceso para visualizar valores promedios en el tiempo. Filtros de frecuencias y registradores para análisis de vibraciones**
Frecuencia	**Permanente y cíclica**	**Inicialmente cíclica**	**Permanente y cíclica**

Es importante resaltar que cada uno de los métodos de orden instrumental avanzado, puede aportar resultados importantes en el análisis de la situación que genera alguna o todas las causas raíces de fallas, pero es más importante correlacionar estos análisis individuales, pues en el estudio del conjunto de muchos de ellos, que se pueden relacionar, pueden estar mejores consideraciones técnicas o de ingeniería que aporten excelentes soluciones a los estados de no funcionalidad por causas de mantenimiento, en vez de hacerlo solo individualmente(Benítez, 2007)(Benítez, 2008)[249].

[248] *Los autores Kelly y otro (1998,121) las circunscriben sólo a acciones predictivas de mantenimiento, esto está bien, pero también es cierto que se pueden aplicar a las otros tipos de tareas de mantenimiento (correctivas, modificativas o preventivas) según sea el caso.*

[249] *Por ejemplo, si se analizan independientemente las técnicas descritas por el autor en el numeral 5.7.2: térmica, tribológica y de vibraciones, se puede realizar un análisis no muy adecuado que de pronto conduce a soluciones no apropiadas. Estas tres variables están íntimamente relacionadas y la modificación de una de ellas, normalmente afecta las otras dos. Una "ruta de tribología" (monitoreo cualitativo periódico del estado de la película lubricante, la temperatura de operación y el nivel de vibraciones) correctamente*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

5.8 Resumen del Capítulo 5 – Nivel Instrumental

La quinta sección muestra, profundiza y compara todas las cuatro divisiones del Nivel 1 – Instrumental del Enfoque Sistémico Kantiano, aplicado a mantenimiento, se dejan sentadas todos las bases, los criterios y herramientas necesarias para que mantenimiento pueda funcionar adecuadamente, en aras de prepararlo para que las empresas puedan alcanzar los niveles superiores: operacional, táctico y estratégico.

5.9 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 5

- Describa cada uno de los Factores productivos y explique en qué y cómo cada uno de ellos al mantenimiento industrial.
- Explique la Función macroeconómica de la productividad (o de la producción), detallando lo que ocurre con la Producción, el producto promedio y la productividad en cada una de las Zonas. Haga un gráfico de las tres curvas para un Factor Productivo.
- ¿Cuál es el punto ideal de ubicación de dos factores productivos? Explique en una gráfica bosquejando por favor, las tres zonas y las tres curvas para cada uno de los dos Factores Productivos.
- Enuncie las diferencias básicas entre Eficacia, Eficiencia y Efectividad.
- Defina Actividad, Procesos y Macro-procesos.
- Esboce los conceptos fundamentales de *TQC* y *TQM*, asociados a mantenimiento.
- Por favor describa las características de las 5 S y, explique cada una de ellas, sus ventajas, utilidades y aplicaciones.
- Fundamente los fundamentos y aplicaciones del mejoramiento continuo en mantenimiento.
- Describa los principales aspectos que contiene el concepto de Signos Vitales del *Quantum Performance* y sus aplicaciones, ventajas y limitaciones frente al *Balanced Scorecard*.
- Exponga y sustente la aplicabilidad en mantenimiento, de al menos tres herramientas estadísticas.
- Haga una lista de los pasos requeridos en el Análisis de Fallas, luego describa cuándo se usa, sus ventajas y sus limitaciones.
- Realice en grupo, un caso real de análisis de fallas siguiendo todas las metodologías propuestas en el libro. Utilice las plantillas propuestas y grafique el Volumen de Riesgo.
- ¿Cuáles son los diferentes pasos que se siguen en el *RCFA*? Sustente cada uno de ellos.
- En cuanto a tablas de valoración, ¿cuáles son las diferencias y similitudes entre *RPN* y *RCM*?
- ¿Enuncie al menos cinco diferencias entre productos o repuestos *Push* y *Pull*?
- ¿En qué instante se hacen los pedidos *Push* y *Pull*?, diga por favor también qué cálculos se llevan a cabo para estimar las cantidades a pedir de cada uno de ellos.
- ¿Qué controles conoce Ud. que se aplican a las referencias *Pull* y para qué sirven esos controles?

aplicada puede conducir a realizar una "ruta de confiabilidad", con el fin de garantizar el funcionamiento correcto de los equipos y la aplicación, a tiempo, de los correctivos necesarios (Benítez, 2008).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- ¿Cuáles considera Ud. son las principales razones, que deben existir para realizar subcontrataciones de actividades mantenimiento en una empresa?

- Describa las diferencias entre los modelos y métodos *Flash Audit* y Jerarquía Analítica, a la hora de hacer auditorías de mantenimiento.

- Practique un caso real de *Flash Audit* y otro de Jerarquía Analítica en un sector industrial de su localidad o en una empresa real, utilizando todos los programas aportados para ello en este libro.

- Enuncie, explique y fundamente al menos tres instrumentos avanzados técnicos específicos de mantenimiento, que sean de uso común en actividades predictivas de mantenimiento o en análisis de fallas.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ejercicio 3 - Productividad – Capítulo 5

Favor complete la Tabla, haga las tres gráficas, diga cuál es el punto ideal del Factor Productivo y sustente su respuesta.

N F No. Factor	Q Producción	$Q_{t+1} - Q_t$ Incremento	Q_t / No. Factor PP - Producto promedio	$(Q_{t+1} - Q_t) / (NF_{t+1} - NF_t)$ Productividad
No. Factor	Producción	Incremento	Producto promedio	Productividad
0	0	0	0	0
1	12300	12300		12300
2		98400		
3	288558		96186	
4		273183		
5	1216224		243245	
6	2214000			
7		861000		861000
8	4004265			929265
9	4674000		519333	
10		492000		492000
11			503182	369000
12	5781000	246000		
13		123000	454154	
14	5965500			61500
15	5965500	0		0
16		-61500	369000	
17	5658000	-307500		-246000
18		-369000		-369000
19	4674000			
20	2885088			
21	984000			-1901088
22		-2502435		
23	-5535000		-240652	
24	-9551565	-4016565		-4016565
25	-13568130			
26		-4016565		-4016565

Ejercicio 4 - Clasificación Push, Pull o retiro de almacén – Capítulo 5

Acorde a los valores de demanda histórica que se dan en las siguientes tablas, clasifique los siguientes repuestos en *Push*, *Pull* o retirar de Almacén. Hágalo por favor en la columna sugerido.

Numeral	Clasifique acá	Almacén	Ítem	Categoría	Referencia	Descripción	Inventario último Mes	Unidad	Valor
1	Pull		310	LLTT	100309	TORNILLO 5/8 X 2 (T.W.A.)	21172	UN	475
2	Push		246	LLTT	100245	ESPACIADOR AMORTIGUADOR DOBLE 954 MCM	556	UN	30800
3	Pull		309	LLTT	100308	TORNILLO 5/8 X 1.3/4 (T.W.A.)	21372	UN	400
4	Pull		4	LLTT	100003	BLINDAJE PARA 954 MCM	5	UN	1014836
5	Push		222	LLTT	100221	CABLE ACSR 954 MCM	30588	MR	10000
6	Pull		308	LLTT	100307	TORNILLO 1/2 X 1.3/4 (T.W.A.)	3615	UN	327
7	Revisar o Retirar de Portafolio		183	LLTT	100182	AISLADOR DE VIDRIO DE 46000 LBS	2363	UN	68160
8	Pull		287	LLTT	100286	EMPALME DE COMPRESION PARA 954 MCM	184	UN	41180
9	Pull		239	LLTT	100238	GRAPA BIFILAR CMA 95	72	UN	6000
10	Pull		307	LLTT	100306	TORNILLO 1/2 X 1.1/2 (T.W.A.)	6576	UN	280
11	Push		311	LLTT	100310	TORNILLO 5/8 X 2.1/4 (T.W.A.)	1831	UN	517
12	Pull		256	LLTT	100255	GRAPA TIERRA 2 BAL D7-16	78	UN	3000
13	Pull		221	LLTT	100220	CABLE ACSR 110.8 MCM	6094	MR	8000
14	Revisar o Retirar de Portafolio		330	LLTT	100329	TORNILLO 3/4 X 2.1/2 (T.W.A.)	0	UN	2216
15	Revisar o Retirar de Portafolio		291	LLTT	100290	TORNILLO 5/8 X 8 (2T)	2185	UN	1130
16	Pull		317	LLTT	100316	TORNILLO 5/8 X 1.1/2 (T.W.A.)	1748	UN	474
17	Revisar o Retirar de Portafolio		3	LLTT	100002	BLINDAJE PARA 110.8 MCM	0	UN	15800
18	Pull		224	LLTT	100223	CAMISA DE REPARACION PARA 954 MCM	234	UN	35000
19	Pull		329	LLTT	100328	TORNILLO 3/4 X 2 (T.W.A.)	118	UN	815
20	Pull		263	LLTT	100262	GRILLETE CH 30	90	UN	15000

Ensamble horizontalmente las Figuras.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Demanda Histórica									Demanda Histórica													Demanda Hist
Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12	Mes 13	Mes 14	Mes 15	Mes 16	Mes 17	Mes 18	Mes 19	Mes 20	Mes 21	Mes 22	Mes 23
-136	-581	-473	-709	-588	-449	-1,186	-487	-1,192	-905	-915	-457	-896	-467	-993	-411	-518	-875	-270	-320	-967	-1,184	-357
-399	-579	-173	-652	-498	-466	-3	-1,189	-68	-258	-1,106	-1,151	-883	-1,130	-1,032	-556	-332	-596	-501	-651	-164	-759	-869
-269	-337	-97	-814	-1,188	-584	-828	-1,136	-1,025	-114	-242	-613	-742	-133	-73	-1,008	-220	-372	-629	-726	-129	-979	-909
-166	-677	-260	-802	-465	-332	-1,122	-125	-879	-82	-1,121	-103	-1,262	-351	-140	-885	-861	-1,180	-1,267	-614	-401	-362	-1,254
-872	-876	-1,183	-556	-450	-380	-454	-72	-1,087	-822	-869	-1,099	-232	-790	-739	-36	-1,252	-411	-170	-1,107	-775	-624	-268
0	0	0	-99	0	0	-159	-628	-1,120	-211	-946	-439	-449	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-423	-696	-1,199	-1,101	-252	-817	-530	-1,243	-938	-1,116	-381	-495	-978	-133	-1,032	-964	-7	-800	-734	-1,097	0	-444	-947
-797	-68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,048	-568	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-258	-653	-1,020	-1,051	0	0	0	0	0	0	0	-985	-1,224	-1	-859	-1,012	-427	-137	-809	-311	-858	-722	-237
-419	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-417	-43	-1,283	-500	-1,274	-1,193	-185	-410	-311	-1,249
-82	0	0	-912	-1,147	-764	0	0	0	0	0	0	0	0	-970	-111	-1,269	-235	-584	-859	-1,218	-1,075	-301
-682	-234	-668	-70	-286	-361	-334	-699	-359	-83	-8	-125	-602	-44	-550	-432	-384	-825	-131	-652	-308	-541	-783
-896	-511	-347	-338	-989	-668	-91	-328	-245	-924	-249	-938	-1,085	-677	-775	-923	-1,193	-785	-686	-728	-312	-725	-1,083
-746	-744	-157	-588	-1,063	-766	-1,284	-236	-938	-580	-1,153	-736	-1,244	-854	-935	-1,131	-725	-949	-571	-129	-417	-1,118	-1,110
-94	-697	-1,015	-782	-468	-77	-678	-1,281	-890	-416	-564	-83	-768	-462	-927	-1,236	-338	-368	-697	-226	-452	-278	-982
-659	-135	-874	-567	-1,184	-955	-754	-861	-567	-365	-180	-934	-226	-408	-407	-130	-865	-164	0	-403	-176	-1,272	-715
-1,173	-825	-579	-496	-966	-775	-763	-1,145	-120	-615	-471	-448	-1,090	-293	-382	-618	-581	-1,203	-663	-520	-207	-562	-249
-525	-740	-1,159	-440	0	-1,120	-167	-309	-697	-85	-426	-866	-1,041	-1,089	-1,033	-1,165	-587	-161	-79	-403	-190	-850	-423
-490	-541	-342	-1,268	-886	-762	-1,192	-38	-777	-780	-1,143	-400	-320	-191	-98	-1,060	-725	-54	-297	-185	-820	-745	-768

Histórica						Demanda Histórica											Demanda Histórica							Familia
Mes 23	Mes 24	Mes 25	Mes 26	Mes 27	Mes 28	Mes 29	Mes 30	Mes 31	Mes 32	Mes 33	Mes 34	Mes 35	Mes 36	Mes 37	Mes 38	Mes 39	Mes 40	Mes 41	Mes 42	Mes 43	Mes 44	Mes 45	Mes 46	
-357	-643	-1,273	-152	-67	-65	-291	-1,192	-16	-133	-1,087	-964	-152	-485	-387	-952	-1,101	-701	-1,189	-247	-104	-860	-158	-237	6
-869	-1,183	-338	-1,284	-947	-458	-1,218	-1,097	-492	-85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-855	-528	-193	5
-909	-779	-705	-1,091	-1,234	-906	-1,178	-1,174	-1,084	-841	-260	-282	-790	-1,149	-451	-70	-1,283	-509	-61	-147	-1,034	-93	-365	-778	6
-1,254	-253	-565	-425	-783	-397	-1,204	-1,280	-106	-873	-1,181	-508	-446	-1,268	-336	-353	-1,019	-984	-319	-884	-598	-147	-537	-1,084	5
-268	-312	-1,004	-312	-264	-686	-1,267	-592	0	0	0	0	-646	-200	-581	-942	-935	-14	-383	-435	-376	-191	-147	-991	1
0	0	-603	-1,032	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,073	0	0	0	0	0	-743	-682	-1,111	0	0	-143	6
-947	-1,218	-1,071	-599	-1,054	-790	-734	-1,180	-11	-1,191	-408	-1,109	-444	-1,021	-527	-678	-1,023	-458	-861	-691	-463	-768	-511	-496	7
0	0	0	0	0	0	0	-577	-1,256	-477	-1,021	-1,215	-694	-798	-378	-1,166	-809	-956	-116	-643	-587	-752	-402	-409	5
0	0	0	0	0	0	0	-267	-954	-454	-1,241	-1,253	-878	-115	-759	0	0	0	-56	-45	-34	-56	-75	-67	5
-237	-865	-406	-757	-120	-845	-427	-106	-1,188	-498	-829	-617	-389	-1,241	-299	-365	-1,265	-354	-938	-67	-373	-1,199	0	-1	6
-1,249	-517	-389	-1,077	-7	-1,095	-569	-995	-835	-734	-166	-453	-1,195	-361	-882	-41	-67	-848	-459	-664	-203	-1,150	-942	-840	6
-301	-759	-118	-1,130	-516	-408	-179	-145	-839	-55	-897	-667	-901	-871	-1,256	-384	-1,240	-155	-336	-237	-909	-462	-554	-1,175	5
-783	-340	-727	-1,056	-732	-803	-1,236	-432	-76	-43	-327	-1,001	-635	-428	-389	-699	-1,252	-975	-428	-1,034	-1,152	-584	-678	-765	1
-1,083	-585	-149	-672	0	-227	-616	-383	-1,199	-1,079	-978	-983	-789	-1,047	-1,007	-960	-338	-1,073	-987	-620	-744	-468	-687	-123	6
-1,110	-1,145	-648	-722	-655	-395	-774	-72	-999	-244	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-67	-34	456	-5	6
-982	-339	-277	0	-39	-1,009	-575	-57	-3	-554	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
-715	-1,101	-44	-674	-709	-141	0	-391	-882	-355	0	0	0	0	0	0	-7	-5	-23	-12	-6	-3	-56	-5	5
-249	-1,013	-443	0	-595	-514	-1,014	-102	-279	-1,048	0	0	0	0	0	0	-15	-20	-34	-46	-45	-56	-4	-1	5
-423	-1,269	-709	0	-927	-344	-935	-974	-469	-1,193	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
-768	-439	0	-396	-195	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-7	-12	-17	-22	-27	-32	-37	-42	5

Números de veces de Demanda	Rotación 36 meses	Rotación 24 meses	Rotación 12 meses	Rotación 6 meses	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
	Suma % - 40 %	Suma % - 60 %	Ultimos doce meses - 80%	Ultimos seis meses - 90 %	Revisar	Revisar	Revisar	Revisar
46	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	1	1	1	1
35	69.44%	54.17%	25.00%	50.00%	1	0	0	0
46	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	1	1	1	1
46	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	1	1	1	1
42	88.89%	83.33%	100.00%	100.00%	1	1	1	1
15	27.78%	29.17%	41.67%	66.67%	0	0	0	0
45	97.22%	100.00%	100.00%	100.00%	1	1	1	1
19	47.22%	70.83%	100.00%	100.00%	1	1	1	1
16	38.89%	58.33%	75.00%	100.00%	0	0	0	1
38	94.44%	95.83%	91.67%	83.33%	1	1	1	0
34	91.67%	100.00%	100.00%	100.00%	1	1	1	1
36	88.89%	100.00%	100.00%	100.00%	1	1	1	1
46	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	1	1	1	1
45	97.22%	95.83%	100.00%	100.00%	1	1	1	1
35	69.44%	54.17%	25.00%	50.00%	1	0	0	0
31	58.33%	37.50%	0.00%	0.00%	1	0	0	0
38	77.78%	70.83%	66.67%	100.00%	1	1	0	1
39	80.56%	70.83%	66.67%	100.00%	1	1	0	1
30	58.33%	37.50%	0.00%	0.00%	1	0	0	0
34	66.67%	50.00%	66.67%	100.00%	1	0	0	1

Criterio 5		Criterio 5	Menor a 50% cumple con 1	Respuestas			
Promedio mes	Desviación estándar	Porcentaje desviación estándar	Criterio Media / Desviación Estándar	Sugerido			
604.17	384.20	63.59%	0	4			
493.33	432.92	87.76%	0	1			
639.80	396.86	62.03%	0	4			
657.85	396.14	60.22%	0	4			
552.22	384.08	69.55%	0	4			
205.17	363.11	176.98%	0	0			
731.15	348.75	47.70%	1	5			
285.24	405.76	142.25%	0	4			
171.09	357.52	208.97%	0	1			
515.50	425.47	82.54%	0	3			
473.33	449.12	94.89%	0	4			
515.65	447.13	86.71%	0	4			
542.46	333.46	61.47%	0	4			
678.48	329.97	48.63%	1	5			
510.39	461.25	90.37%	0	1			
361.57	389.11	107.62%	0	1			
374.24	389.53	104.09%	0	3			
434.20	394.11	90.77%	0	3			
442.93	443.85	100.21%	0	1			
328.43	391.46	119.19%	0	2			

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ejercicio 5 - Push por Asignación - Capítulo 5

Una empresa desea calcular las cantidades *Push* a pedir por Asignación, favor rellene complemente el cuadro siguiente, acorde a las pautas dadas a este método.

		Artículo Push 1	Artículo Push 2	Artículo Push 3	
Más	Pedido - Pronóstico - Estimado - este mes nuevo	2765	876	3576	
Menos	Inventario a principio de período	1093	343	34	Menos
	Ventas mes anterior	1232	154	2324	
	Pedido mes anterior	353	345	657	
	Error mes anterior	879	0		
	Disponibilidad asignada		92.00%	84.09%	
	Z	1.28			
Más	Error Mes anterior Venta mayor a pedidos mes anterior Ventas Despachos aún pendientes	1126.48	0.00	1663.94	Más
Igual a	Sub-total hasta ahora	2798.48			Igual a
	Demanda promedio = (demanda mes anterior + pronóstico mes siguiente) / 2	1998.5	515	2950	
		Tipo A	Tipo B	Tipo C	
	Producto Tipo A B o C	1.25	0.75	0.35	
Más	Inventario libre deseado a final de mes	2498.13	386.25	1032.50	Más
Prueba	Valores positivos hasta acá	5296.61			Prueba
Sub-Total	Requerimiento parcial este nuevo mes		919.25	6238.44	Sub-Total
	Capacidad total	23289.00	Diferencia		*Cálculos*
	Requerimiento total		10834.70		
	Capacidad total menor que Requerimiento total				
Suma	Volumen total a comprar cuando Capacidad total es menor a Requerimiento total = Demanda parcial * Capacidad posible / Suma Total Demanda	0.00			
	Capacidad total mayor o igual que Requerimiento total				
Excedente	Volumen adicional por referencia total a comprar cuando Capacidad total es mayor a Requerimiento total = Demanda parcial * Capacidad posible / Suma Total Pronósticos Demanda	8227.95		2606.76	5213.51
					Total
Total	Requerimiento final este nuevo mes	13524.55			25895.76

Ejercicio 6 - Cálculos generales de un Almacén - Capítulo 5

Realice los cálculos totales para una empresa o almacén de repuestos usando el Programa de CD 14 - Inventarios automático de 10000 Referencias y aplíquelo al menos para 50 Ítems.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

6 Niveles Estratégico, Táctico y Operacional

La descripción de los niveles dos, tres y cuatro de mantenimiento y producción bajo un enfoque sistémico, permite llegar al conocimiento y control total del sistema de ingeniería de fábricas.

6.1 Objetivo de Capítulo 6

Manejar los elementos relevantes en los niveles dos (operacional), tres (táctico) y cuatro (estratégico) de mantenimiento, de tal manera que integrados a los conceptos y aplicaciones ya vistas del nivel uno, bajo un enfoque sistémico Kantiano, permitan alcanzar el grado de éxito propuesto en mantenimiento, mediante una gestión y operación del mismo, de una manera efectiva - Nivel 4 - Analizar - Escala de Bloom, Barret y Gagñé (Gagné@, y otros, 2008).

6.2 Introducción a Capítulo 6

Esta última unidad propende la integración total del enfoque sistémico, detallando conceptualmente y de una manera práctica los niveles dos, tres y cuatro del sistema integral de mantenimiento, en forma específica profundiza y da criterios de análisis de cada una de las cuatro operaciones (correctivas, modificativas, preventivas y predictivas), de las tácticas más usuales (*TPM*, *RCM*, *TPM* & *RCM*, Proactiva, Reactiva, *PMO*, *World Class*, etc. e integrando los requerimientos necesarios de la fase estratégica, que permiten evaluar, predecir y alcanzar el grado de éxito que se adquiere en mantenimiento y producción, mediante el CMD y el *LCC*.

6.2.1 Conocimientos previos requeridos de capítulo 6 – Niveles Estratégico, Táctico y Operacional

Es necesario contar con todos los conocimientos hasta ahora desarrollados en este libro, de tal forma que para poder alcanzar este nivel alto de análisis, se puedan integrar todos los conceptos y aplicaciones de los cuatro niveles de mantenimiento, que es la estructura de esta obra.

6.3 Nivel Operativo

El enfoque sistémico kantiano en su segundo nivel plantea las posibles acciones que pueden ejecutarse en mantenimiento, comprende básicamente tareas de mantenimiento antes y después de la falla real o potencial.

Ilustración 154 - Clasificación real o mental de los niveles de mantenimiento

El nivel 2 de mantenimiento es de orden mental, es decir, son las posibles acciones mentales que puede desarrollar el hombre sobre las máquinas, su ejecución organizada, lógica y coherente se da en el nivel tres (táctico), es imprescindible tener en cuenta que el tipo de tarea que se realiza si es planeada o no, si es reparación o mantenimiento, si es correctiva, modificativa, preventiva o predictiva, es solo el hombre quien puede diferenciarla, lo que la califica como mental, a diferencia del nivel uno de mantenimiento donde todos los instrumentos o sus aplicaciones son reales, al igual el nivel tres en mantenimiento es de orden real ya que se diferencian notoriamente las tácticas entre sí y en contraste con el nivel cuatro o estratégico, donde las situaciones que se manejan son indicadores y cifras que sólo son del entendimiento humano, por lo cual es mental.

Se definen como reparaciones a las tareas no planeadas de mantenimiento que se realizan después de que sucede la falla[250], las hay de dos tipos: correctivas y modificativas; mientas que se denominan como mantenimiento a las

[250] *Con el fin de regresarle la funcionalidad al equipo.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

tareas planeadas que se dan antes de que suceda la avería[251], entre éstas aparecen las preventivas y las predictivas, a estas últimas también se les reconoce como tareas proactivas(Moubray, 2004).

6.3.1 Acciones correctivas

El mantenimiento correctivo consiste en la pronta reparación de la falla, se le considera de corto plazo[252], las personas encargadas de avisar la ocurrencia de las averías son los propios operarios de las máquinas o equipos y corresponde al personal de mantenimiento las reparaciones de éste. Exige, para su eficacia, una buena y rápida reacción de la reparación (recursos humanos asignados, herramienta, repuestos, elementos de transporte, etc.); la reparación propiamente dicha es rápida y sencilla, así como su control y puesta en marcha (Navarro, y otros, 1997).

El principal inconveniente que presenta este tipo de acción de mantenimiento es que el usuario detecta la falla cuando el equipo está en servicio o recién pierde su funcionalidad, ya sea al ponerlo en marcha o durante su utilización. Si se tiene en cuenta que la mayoría de los operarios encargados de usar los equipos no son expertos en fallas. Entre algunos de los síntomas que determinan la presencia de fallas, pueden estar altos niveles de ruidos y/o anomalías que pueden generar otras averías mayores (Navarro, y otros, 1997).

Existen dos tipos de tareas no planeadas de orden correctivo:

- El desvare, que consiste en aplicar una reparación inmediata al equipo para devolverlo a la condición de trabajo u operación, pero no necesariamente a sus condiciones estándares; se aplica en urgencias donde no se debe paralizar el proceso operativo de bienes y/o servicios.

- Reparación correcta y definitiva, donde de alguna manera se tienen experiencias previas similares y se conoce la causa raíz de la falla; esta reparación devuelve la máquina a sus condiciones estándares de producción y mantenimiento.

Las tareas de mantenimiento correctivo son las que se realizan con intención de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema, tras la pérdida de su capacidad para realizar la función o las prestaciones que se requieren. Una tarea de mantenimiento correctivo típica consta de las siguientes actividades (Knezevic, 1996):

- Detección de la falla
- Localización de la falla
- Desmontaje
- Recuperación o sustitución
- Montaje
- Pruebas
- Verificación

6.3.2 Acciones modificativas

La tarea no planeada denominada acción modificativa, es una versión superior y desarrollada de las acciones correctivas. Sucede cuando en forma continua se aplican reparaciones que no surten efecto en la recuperación de la funcionalidad del equipo, es entonces cuando se da lugar a la aplicación de algunos de los instrumentos básicos o avanzados de mantenimiento, con el fin de determinar la razón primaria de la condición fuera del estándar, una vez se encuentra la causa raíz del problema se pasa a aplicar políticas de control mediante la realización de modificaciones en el equipo o sistema, a través de la utilización de conceptos y acciones propias de la ingeniería de diseño; estos hechos en forma sistémica se reconocen como procesos de acciones modificativas de mantenimiento.

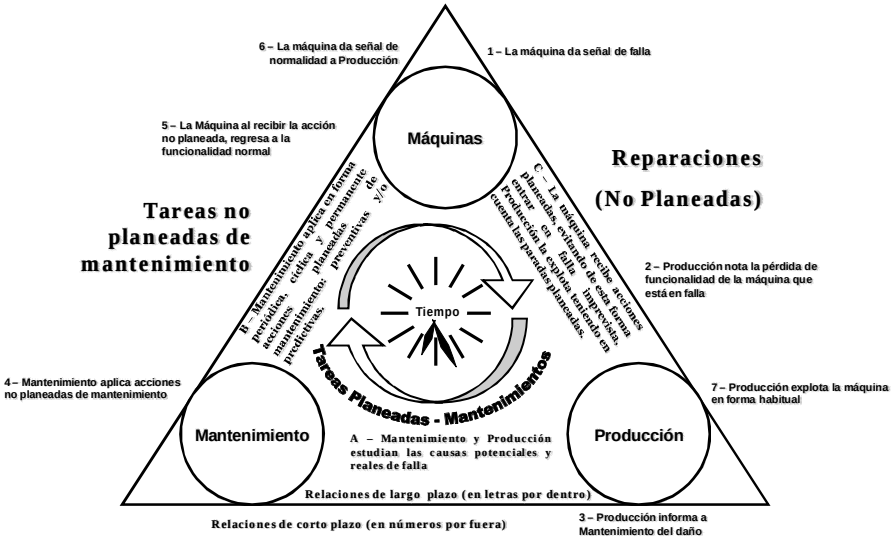
Cuando la modificación no se hace como consecuencia de un estado de falla, sino con el fin de mejorar la productividad o elevar la confiabilidad del equipo, también califica como acción modificativa, pero en su versión

[251] *Se realizan con el único fin de evitar fallas futuras de orden real o potencial.*
[252] *Lo único que se exceptúa de este concepto de corto plazo, es la organización de largo plazo que se le da en algunas empresas a los almacenes de repuestos.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

del elemento producción, téngase en cuenta que la modificación puede sugerirse a partir de cualquiera de los tres elementos propios de un sistema de mantenimiento[253].

Ilustración 155 - Reglas y relaciones cíclicas entre los elementos de mantenimiento para las acciones



(Mora, 2007a)

Las acciones modificativas de mantenimiento, intentan eliminar las causas de la fallas (Kelly, y otros, 1998). Esto consiste en mejorar el diseño de los equipos sea por envejecimiento o por obsolescencia tecnológica, en hacerles modificaciones, que permitan una mayor vida útil del mismo y/o una mejor productividad de los bienes que fabrica (Navarro, y otros, 1997)

Las tareas planeadas o proactivas que se ejecutan antes de las fallas, catalogadas de largo plazo[254], presentan algunas versiones, entre ellas, sobresalen:

6.3.3 Acciones preventivas

La aplicación de instrumentos avanzados y básicos de mantenimiento, deriva en el conocimiento de las fallas y de su causa raíz, con todas sus connotaciones asociadas, como: características, situaciones propias y de ambiente donde se da, periodicidad, ocurrencia, medidas, soluciones, síntomas, causas básicas e inmediatas, modos de falla, función que se afecta, falla funcional presente, etc., permitiendo planear en el tiempo cuándo debe hacerse la reposición o reconstrucción del elemento antes de que entre en modo de falla por cuerpo o por función.

Lo normal es que el parámetro de medición para determinar el momento del cambio físico (o reconstrucción) o de su ajuste funcional se haga en términos tales como: horas de servicio, cantidad de desgaste, unidades producidas, velocidades alcanzadas, consumo, valor de alguna variable de condición, etc. Posteriormente y una vez conocida la cifra previa del parámetro, se programa y se realiza la acción preventiva antes de que alcance la condición fuera del estándar, en ese momento se interviene y se realiza la tarea proactiva de falla, que se conoce como preventiva. La novedad de las acciones preventivas es que nunca se debe alcanzar el estado de falla, presenta el inconveniente de que cuando el elemento es sustituido o ajustado funcionalmente, se pierde cierta cantidad de vida útil ya que no alcanza su estado de falla o desarrollo completo de la vida útil. Es importante recordar que el propio nombre de la acción establece su condición, que se pueda prevenir la falla, y sobre todo que se pueda planear.

En las acciones preventivas realmente lo que interesa es el estado inicial (o en tiempo real) en condición de funcionalidad y el momento previo a la situación fuera del estándar, no evalúa con profundidad los estados

[253] *Máquina, por encontrase en falla o en baja confiabilidad y/o productividad - Mantenimiento, por las experiencias negativas de acciones correctivas previas - Operación, con el fin de elevar la productividad o mejorar los costos de producción.*
[254] *Para su realización se estructuran andamiajes e inversiones de largo plazo en los ocho factores productivos.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

intermedios, aunque realiza inspecciones y mediciones periódicas para poder definir las circunstancias previas a la condición fuera de estándar.

El mantenimiento preventivo es la ejecución de un sistema de inspecciones periódicas programadas racionalmente sobre el activo fijo de la planta y sus equipos, con el fin de detectar condiciones o estados inadecuados de esos elementos, que pueden ocasionar circunstancialmente paros en la producción o deterioro grave de máquinas, equipos o instalaciones, y realizar en forma permanente el cuidado de mantenimiento adecuado de la planta para evitar tales condiciones, mediante la ejecución de ajustes o reparaciones, mientras las fallas potenciales están aun en estado inicial de desarrollo (Patton, 1995). La función principal del mantenimiento preventivo, es conocer el estado actual de los equipos mediante los registros de control llevados en cada uno de ellos y en coordinación con el departamento de programación, para realizar la tarea preventiva en el momento más oportuno. Consiste entonces, en una serie de actuaciones sistemáticas en las que desmontan las máquinas y se observan para reparar o sustituir los elementos sometidos a desgaste.

El mantenimiento preventivo se puede clasificar en dos versiones, una de ellas cuando se basa en el tiempo o sea en la frecuencia de inspección y la segunda basada en la condición de desgaste (o denominada condición de estado) encontrada en la última revisión; ambas metodologías permiten fijar con antelación la próxima inspección a que tuviere lugar en el elemento o máquina. El primero de los métodos conduce al mantenimiento preventivo sistemático y el segundo conlleva al mantenimiento preventivo condicional lográndose con este último maximizar la vida útil del elemento y consiguiendo de esta forma reducir los costos de mantenimiento. Ambas metodologías se basan en la permanente inspección y análisis crítico de las condiciones (Gude@, 1998). Sus principales ventajas frente a otros tipos de tareas de mantenimiento son: evitar averías mayores como consecuencia de pequeñas fallas, preparar las herramientas y repuestos, aprovechar, realizar las reparaciones en el momento más oportuno tanto para producción como para mantenimiento, distribuir el trabajo de mantenimiento optimizando la cuadrilla de reparación y disminuir la frecuencia de los paros y aprovechar éstos para realizar varias reparaciones diferentes al mismo tiempo (Navarro, y otros, 1997).

La secuencia de pasos para la implementación, desarrollo, plan de inspecciones, rutas lógicas, programa de chequeos, etc. en las acciones preventivas debe tener en cuenta los parámetros que se listan a continuación:

Ilustración 156 - Algunos aspectos relevantes de las tareas o acciones preventivas

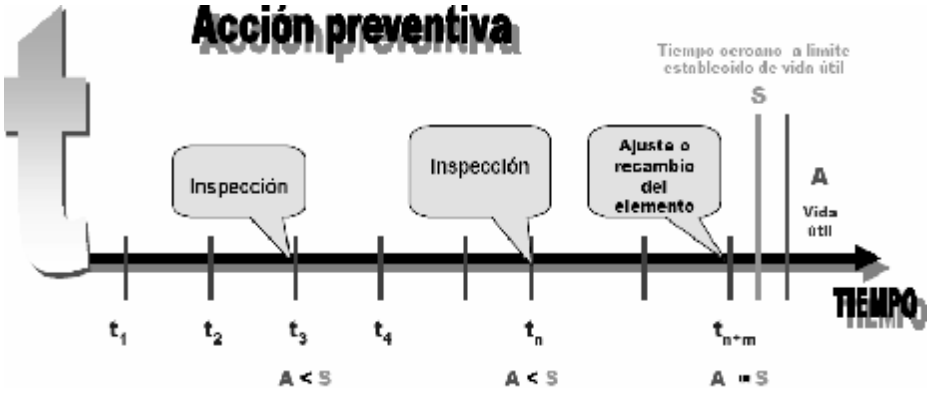
Selección de maquinaria o equipos críticos:			
	Criterios por los cuales se considera crítico		
	Análisis de las variables críticas		
	Sistemas de medición de las variables		
	Inspección y periodicidad de las variables		
Rutas lógicas			
Codificación			
Se estudia un patrón de medida:			
	Horas de funcionamiento		
	Número de unidades producidas		
	Tiempo calendario		
	Ciclos de trabajo		
	Horas de funcionamiento de la planta		
	Kilómetros recorridos, etc.		
	El valor de las variables depende del factor determinante del mantenimiento preventivo así:		
		Regularidad de la producción (plantas de producción)	
		Continuidad del servicio (atención al usuario)	
		Seguridad del servicio (seguridad de personas)	
		Limitaciones técnicas (bajo rendimiento)	
		Prestigio del producto (control de calidad)	
		Otro parámetro relevante	
Se adopta un límite de vida útil en servicio que puede ser:			
	Durante el límite de vida útil:		
		Inspecciones periódicas	
			Inspecciones menores
			Inspecciones mayores
			Recorrido parcial
		Trabajos de mantenimiento:	
			Accidental
			Tareas periódicas
			Tareas programadas
	Al término del límite de vida útil:		
		Ajuste o recambio del elemento	
Se aplica a máquinas o instalaciones:			
	Estructuras integrales		
	Plantas de potencia		
	Cualquier sistema, maquina o elemento que tenga fallas y causas raíces.		
	Equipos, sistemas fijos		
	Componentes accesorios		

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Es importante señalar, que las diferentes acciones requieren mayor grado de herramientas técnicas o avanzadas, en la medida que crecen en nivel desde correctivo, pasando por modificativas, tomando las preventivas y por último las predictivas, en esa secuencia van requiriendo de ayudas de mayor nivel. Por ejemplo, en las reparaciones correctivas basta con las herramientas básicas y con algunos instrumentos avanzados genéricos ocasionales; ya en las acciones modificativas requieren del uso, no sólo de los instrumentos básicos sino que necesita de algunos de los instrumentos avanzados genéricos y específicos, en especial análisis de fallas, *FMECA*, *RPN*, etc.

Las acciones preventivas y predictivas usan la mayoría de los instrumentos básicos y genéricos y en especial las tareas proactivas de orden predictiva usan aparte de las anteriores y con mayor énfasis, los instrumentos avanzados específicos de orden técnico descritos en secciones previas.

Ilustración 157 - Situaciones de las acciones preventivas



(Mora, 2007b)

Las inspecciones siempre son previas al ciclo A de vida útil, la sustitución o el ajuste de la función se realiza en el tiempo S previo a la entrada en situación fuera del estándar o de falla real o potencial.

Las acciones preventivas, se basan en analizar periódicamente, el estado de los elementos de las máquinas y así poder planear de una forma lógica las tareas proactivas. Su gran ventaja es que permite organizar las actividades en forma anticipada logrando de esta forma optimizar los recursos. Los métodos más usuales para este tipo de mantenimiento son: control de vibraciones, control de temperatura, termografía, inspección visual, control de fisuras, teoría de vibraciones, rayos x, control de corrosión, etc., normalmente las inspecciones y mediciones son de orden cualitativo más que cuantitativo.

Entre las formas que pueden aparecer las acciones preventivas sobresalen: el denominado de uso que consiste en que el mismo operario vela constantemente por todas las funciones sencillas de mantenimiento pudiendo anticiparse a graves averías, el *Hard Time* que se basa en revisiones constantes en ciertos intervalos de tiempo donde se examinan ciertas variables de operación y del equipo, desprendiéndose de allí del estado actual la programación de las tareas planeadas y por último un mantenimiento preventivo muy avanzado que sólo usa herramientas avanzadas específicas de orden técnico denominado predictivo; que el autor maneja en forma independiente pues llega a tener suficiente importancia (Gude@, 1998)(Wireman, 2004) (Ávila, 1992) (Patton, 1995).

6.3.4 Acciones predictivas

La permanente revisión y estudio de las variables[255] internas o externas asociadas (directa o indirectamente) al proceso de operación de una máquina, permite diagnosticar el comportamiento futuro en tiempo real de la posible aparición de fallas o situaciones fuera de las condiciones estándares, con el fin de evitarlas a toda costa y alargar los períodos de funcionalidad del equipo y por ende de la vida útil total.

El mantenimiento predictivo estudia la evolución temporal de ciertos parámetros, para asociarlos a la ocurrencia

[255] *Presión, temperatura, corrosión, desgaste, etc.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

de fallas, con el fin de determinar en qué período de tiempo esa situación va a generar escenarios fuera de los estándares, para así poder planificar todas tareas proactivas con tiempo suficiente para que esa avería nunca tenga consecuencias graves ni genere paradas imprevistas de equipos.

La predicción del comportamiento de los parámetros se hace a través de las ciencias: matemáticas, estadísticas, proyectivas, prospectivas, correlacionales, aleatorias, univariables o multivariables, etc. Una de las características más importantes de este tipo de acción de mantenimiento es que no debe alterar el funcionamiento normal de la planta mientras se está aplicando.

La inspección y evaluación de los parámetros se puede realizar en forma periódica o en forma continua, dependiendo de diversos factores como son: el tipo de planta, los tipos de fallas por diagnosticar y la inversión que se quiera realizar.

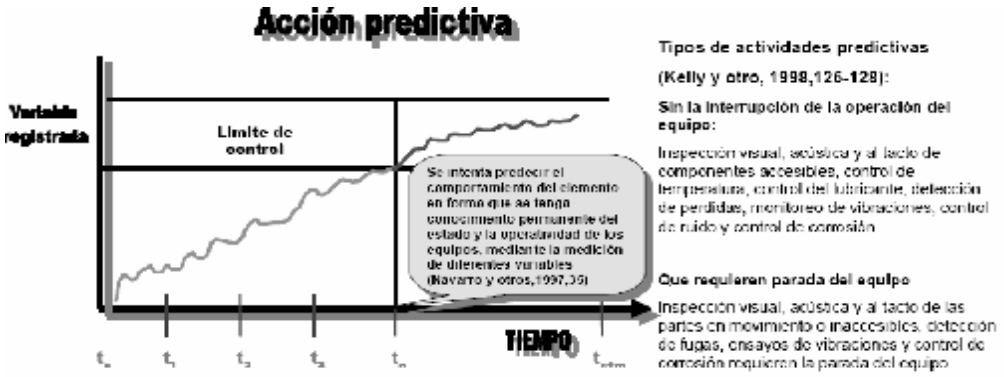
Las acciones predictivas usan en forma exhaustiva y excluyente (o compartida) todos[256] los instrumentos específicos de orden técnico de mantenimiento, como los básicos y avanzados genéricos en toda su plenitud. La condición de estado que es otra de las denominaciones que se dan a las tareas proactivas de índole predictivo consiste en la parametrización y análisis futuro del comportamiento de los parámetros relevantes de las máquinas asociados a los estados de falla *SoFa*.

El mantenimiento predictivo basa sus principios en el conocimiento permanente del estado y la operatividad de los equipos, mediante la medición de diferentes variables. El control que se tiene de estas variables determina la utilización del predictivo.

La principal ventaja radica en la velocidad de detección de la avería (en forma anticipada y temprana al hecho), mientras que en otros casos sólo es posible establecer una frecuencia. A su vez, las acciones predictivas incorporan algunas variables que aumentan la información del estado de los equipos. La cantidad de información que proporciona este tipo de mantenimiento, sumado a la rapidez con que se mida la información, supera ampliamente a las acciones de mantenimiento descritas anteriormente (Navarro, y otros, 1997).

Entre las técnicas descritas en secciones anteriores, las acciones predictivas utilizan bastante la metodología de predicciones bajo Modelos Clásicos y/o AR.I.MA. de series temporales (Mora, 2007c).

Ilustración 158 - Situaciones de las acciones predictivas



Algunas de las ventajas del mantenimiento predictivo son:

- Reduce el tiempo de parada al conocerse exactamente que órgano es el que falla.
- Permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.
- Optimiza la gestión del personal de mantenimiento.
- Realiza la verificación de la condición de estado y monitoreo en tiempo real de la maquinaria, tanto la

[256] *O la mayoría, de los descritos en la sección 5.6. Instrumentos avanzados específicos de mantenimiento - Nivel Instrumental*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

que se realiza en forma periódica como la que se hace de carácter eventual.

- Maneja y analiza un registro de información histórica vital, a la hora de la toma de decisiones técnicas en los equipos.
- Define los límites de tendencia relativos a los tiempos de falla o de aparición de condiciones no estándares.
- Posibilita la toma de decisiones sobre la parada de una línea de máquinas en momentos críticos.
- Facilita la confección de formas internas de funcionamiento o compra de nuevos equipos.
- Provee el conocimiento del historial de actuaciones, para ser utilizada por el mantenimiento correctivo.
- Facilita el análisis de las averías.
- Aplica el análisis estadístico del sistema.

El principal inconveniente del mantenimiento predictivo es de tipo económico. Para cada máquina es necesaria la instalación de equipos de medición de parámetros que puedan ser: presión, pérdidas de carga, caudales, consumos energéticos, caídas de temperatura, ruidos, vibraciones, agrietamientos, etc. (Latino@, 1999a) (Latino, 1999b) (De Groote, 1994).

Las acciones de mantenimiento trátese de planeadas o no (como las modificativas y las correctivas), no son ni buenas ni malas en sí mismas; sólo llegan a ser más adecuadas unas que otras en la medida que se realicen a partir de una táctica dada (*TPM*, *RCM*, combinada, clase mundial, reactiva, proactiva, etc.) y de unos criterios técnicos que permitan establecer si la estrategia utilizada es la más económica y conveniente a la luz del *LCC* y de los beneficios obtenidos en confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad por unidad económica invertida en ese tipo específica de acción (correctiva, modificativa, preventiva y/o predictiva).

Las acciones se deben seleccionar a la luz de los requerimientos de los cuatro niveles y en especial del grado de desarrollo que tenga la empresa en cuestión en el nivel instrumental, pues es este último quien condiciona la viabilidad de la aplicación de reparaciones o mantenimientos.

6.4 Nivel Táctico

El nivel tres del enfoque sistémico kantiano de mantenimiento, se refiere a las diferentes formas de organización que pueden adoptar las empresas para manejar y operar el mantenimiento.

La táctica es la forma en que las diferentes compañías organizan la ejecución y la administración del mantenimiento de una forma coherente, lógica y sistémica; la implementación de una táctica implica la existencia de normas, leyes, reglas que gobiernan la forma de actuar; existen diferentes alternativas internacionales de tácticas, sobresalen entre ellas: TPM, RCM, TPM & RCM combinados, PMO, Proactiva, Reactiva, Clase Mundial, por Objetivos, etc., y en especial la propia táctica que cada organización construye a través del tiempo (Smith, 1998). Se resalta que ninguna táctica es buena, mala o mejor que otra per se, cada una es beneficiosa en la media que sea la más adecuada para las circunstancias y el tiempo que viva la empresa donde se implementa.

Para que una empresa alcance el nivel tres (táctico), debe manejar con suficiencia la mayoría de los instrumentos básicos, avanzados genéricos y específicos de mantenimiento y debe comprender las diferentes acciones factibles de realizar; en el evento en que desee implementar cualquiera de las tácticas y tenga falencias en el nivel instrumental, le toca devolverse hasta superar la implementación de las herramientas específicas requeridas para su implementación.

Al igual que en el nivel dos, las diferentes tácticas no son por sí mismas buenas ni malas, serán exitosas o no en la medida que logren alcanzar las metas de la compañía acorde a su visión y misión, con rangos atractivos de CMD, bajos costos *LCC* y un grado de desarrollo tecnológico (Smith, 1983) y de mercadeo importante; todo en el

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

marco de una planeación de largo plazo, con planes específicos de mantenimiento que integren los cuatro niveles de una forma coherente.

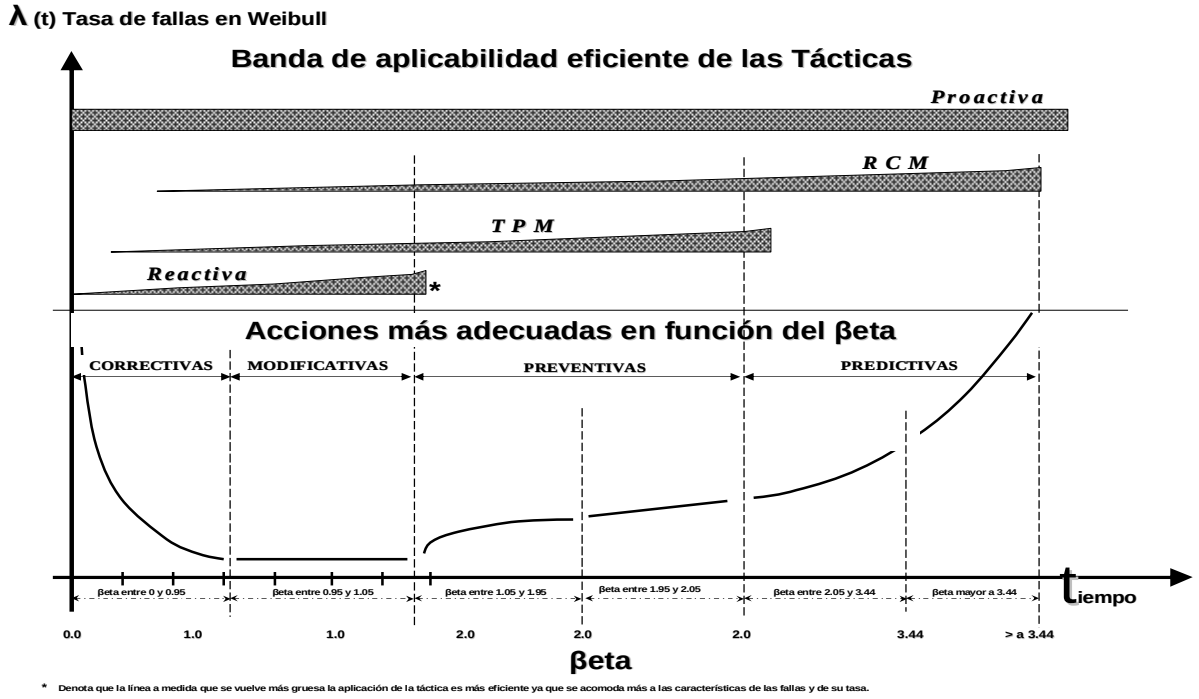
6.4.1 Implicaciones de las diferentes clases de tácticas de mantenimiento

La selección de una táctica se hace con base en las necesidades específicas de cada empresa, existen suficientes diferencias y alternativas entre las diferentes opciones. Lo importante es que la táctica seleccionada sea afín a los dos primeros niveles de mantenimiento, que la táctica siga un lineamiento estratégico de cuarto nivel.

De por sí la escogencia individual de una táctica es indiferente del momento y estado que viva la empresa, puede llegar a ser uno de los grandes pecados estratégicos que conduzcan a resultados deficientes de mantenimiento en el mediano o largo plazo.
Se debe proceder con un diagnóstico inicial integral con alguna de las dos herramientas propuestas (J A o *Flash Audit*) o con otra similar, para determinar el nivel actual de desarrollo en forma previa a la selección táctica, se debe tener muy claro con qué instrumentos se cuenta y cuáles faltan por desarrollar, y en especial se debe tener un panorama claro de la ubicación física[257] de los equipos relevantes y/o críticos en sus curvas de tasas de fallas, de tal forma que haya coherencia entre los estados de los equipos y la táctica que se desea implementar; el comentario es que en parte la decisión de la táctica a seleccionar debe partir de la premisa de la fase en que se encuentra en la curva de la bañera los equipos importantes, las líneas de producción y sobre todo la empresa en conjunto.

Acorde a las características de comportamiento de las fallas, de la tasa de fallas y reparaciones, descritas en las secciones 2.5.1.5 - Curva de Confiabilidad., 2.5.2.2 - Curva de Mantenibilidad y en 2.5.2.1 - Curva de la bañera o de Davies, se plantean diferentes alternativas de aplicabilidad eficiente tanto para las cuatro acciones de mantenimiento como para las tácticas más usadas; este factor es vital en la selección de la táctica acorde al momento CMD que viva la empresa.

Ilustración 159 - Aplicación de acciones y tácticas acorde a los valores CMD y βeta que se tengan



(Mora, 2007b)

[257] *Tener una medición clara de los diferentes valores CMD de los equipos en la curva de la bañera, ya que acorde a ello se puede diagnosticar la preferencia en sí de una táctica.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

6.4.1.1 TPM - Mantenimiento Productivo Total

Las industrias japonesas, después de la Segunda Guerra Mundial, determinan que para competir eficazmente en el mercado internacional deben mejorar la calidad de sus productos; de esta forma se importan del continente americano técnicas de manufactura y de administración, las cuales adaptan rápidamente a sus sistemas industriales; entre los conceptos importados se encuentra el mantenimiento preventivo, posteriormente le incorporan a este otros conceptos como: mantenimiento productivo, prevención del mantenimiento, ingeniería de confiabilidad, etc.; logrando modificar en forma radical el ambiente industrial japonés para conformar lo que se conoce como *TPM* (Mantenimiento Productivo Total), algunas veces definido como mantenimiento productivo implementado por todos los empleados, basado en que la mejora del equipo debe involucrar a todos los funcionarios de la organización, desde los operadores hasta los empleados de la alta dirección (Nakajima, y otros, 1991) (Rey, 2003).

La introducción del *TPM* en la fábrica, debe contar con el apoyo de la alta dirección, ésta debe incorporar el *TPM* dentro de las políticas básicas de la compañía, y concretar metas, tales como incrementar el período de uso del equipo a más del 80%, reducir las fallas en al menos un 50%, entre otros.

Una vez que se establecen las metas, cada empleado debe entender, identificar y desarrollar las actividades de pequeños grupos en el lugar de trabajo, que aseguren el cumplimiento de los objetivos de la empresa. En *TPM*, los grupos pequeños establecen sus propios alcances basados en las metas globales (Tsuchiya, 1995)(Yamashina, 1995) (Rey, 2003). La calidad es un aspecto fundamental y muy ligado al *TPM* (Wakefield, 1985).

La implementación de un programa de *TPM* se puede lograr en intervalos de tiempo que van desde un año hasta tres, para lo cual requiere de un plan marco, que sirve como plan de trabajo en el desarrollo de las actividades, de tal forma que se pueda dividir en etapas, de tal manera que los pequeños grupos adecuen sus funciones en cada nivel.

Los pasos específicos para desarrollar el programa de *TPM* deben ser desarrollados individualmente por cada compañía, es decir, ajustados a sus requerimientos. Hay cinco metas interdependientes, que representan los mínimos requerimientos para desarrollar el programa *TPM* (Nakajima, y otros, 1991) (Nakajima5S@, 2005):

- Mejora en la eficacia del equipo.
- Mantenimiento autónomo por los operadores.
- Un plan de mantenimiento administrado por el departamento de mantenimiento.
- Entrenamiento para mejorar las destrezas y operaciones de mantenimiento.
- Un programa de administración del equipo, para prevenir problemas que ocurran durante nuevas instalaciones o arranque de máquinas.

La mejora continua que involucra el *TPM* desarrolla en las organizaciones: la innovación, la mejora continua propiamente dicha y el mantenimiento de estándares y su superación. Rey Sacristán, define *TPM* como el conjunto de disposiciones técnicas-medias y actuaciones que permiten garantizar que las máquinas-instalaciones y organización que conforman un proceso básico o línea de producción, puedan desarrollar el trabajo que tienen previsto en un plan de producción en constante evolución por la aplicación de la mejora continua (Rey, 2003). El *TPM* tiene como principal objetivo cuidar y utilizar los sistemas productivos, manteniéndolos en su estado base (de origen o de referencia[258]) y aplicando sobre ellos mejora continua (Nakajima, y otros, 1991) (Nakajima5S@, 2005).

El *TPM* procura cuatro principios fundamentales: satisfacción del cliente, dominio de los procesos y sistemas de producción, implicar a personas a través del mantenimiento autónomo y el aprendizaje y la mejora continua. El efecto del *TPM* sobre una organización es que pretende eliminar y llevar a cero las averías y los problemas periódicos repetitivos, para lograr una buena disponibilidad y operatividad mediante la metodología de análisis de pérdidas en seis fases: averías, reglajes, falta de piezas o corta vida de elementos, tiempo de vida útil de elementos más cortos que lo esperado, defectos de proceso y rendimiento reducido entre la operación y su estabilidad. El *TPM* tiene como pilares básicos: el mantenimiento planeado, la ingeniería de mantenimiento, los grupos que procuran elevar los indicadores CMD y la mejora técnica continua (Rey, 1996) (Rey, 2003).

[258] *Estado de referencia, procura mantener características de: tiempos de vida útil, parámetros de proceso, de engrase, de calibración, de electricidad, de calidad, mecánicos, hidráulicos, etc.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

EL *TPM* como táctica es la más básica de todas, es la pionera en este ramo, sus dos grandes propósitos son: elevar la productividad y aunar esfuerzos del personal de producción alrededor del mantenimiento, aglutinando todo el recurso humano alrededor de la gestión y operación del mantenimiento.

Los pasos básicos para su implementación son:

6.4.1.1.1 Pilares del TPM

Son los puntos de apoyo vitales del TPM, para poder ser implementado, lo cual se logra con una metodología con mucho orden y disciplina, son (PilaresTPM@, 2006):

- Mejoras Enfocadas – *Kobetsu Kaizen*: es el conjunto de diferentes tareas a realizar en grupos de personas, que permiten optimizar la efectividad de los equipos, plantas y procesos. Su esfuerzo radica en evitar cualquiera de las 16 pérdidas existentes en las empresas.

- Mantenimiento Autónomo – *Jishu Hozen*: se basa en la activa participación de los operarios y del personal de producción en mantenimiento, consiste en que estos realizan algunas actividades menores de mantenimiento (de baja o mediana tecnología), a la vez que conservan el sitio de trabajo en estado impecable.

- Mantenimiento Planificado: el personal realiza acciones predictivas, preventivas y de mejoramiento continuo, que permiten evitar fallas en los equipos o sistemas de producción.

- Mantenimiento de la Calidad – *Hinshitsu Hozen*: se trata de mantener las condiciones óptimas de funcionalidad de los equipos, con el fin de no desmejorar la calidad de los productos en esos momentos en que se inicia y se mantiene la no funcionalidad adecuada de las máquinas o equipos.

- Mantenimiento Temprano - Prevención del Mantenimiento: son todas las tareas de la fase de diseño, construcción, montaje y operación de los equipos, que permiten garantizar la calidad de la operación y de los productos o bienes que generan las máquinas. Pretende elevar y mantener al máximo posible la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos.

- Mantenimiento de las Áreas Administrativas: se trata de que las áreas de apoyo logístico a operación, producción y mantenimiento, sean las más adecuadas para evitar pérdidas como el *ADT*, *LDT´*, *LDT* u otras, con el fin de mejorar los procesos administrativos y de operación indirecta.

- Entrenamiento, Educación, Capacitación y Crecimiento: se trata de establecer políticas que permitan que todo el personal de producción y de otras áreas de la compañía que inciden en la ingeniería de fábricas, se mantenga educado, entrenado, motivado, etc. con las mejores prácticas internacionales y, que permanentemente esté creciendo en lo personal e institucional. De tal forma que puedan evitar y solucionar problemas de una manera eficaz, que conozcan el funcionamiento de cada máquina, que detecten la incidencia de la funcionalidad de las máquinas en la calidad de los productos y, que posean en todo momento las mejores habilidades y competencias para su trabajo.

- Seguridad, Higiene y Medio Ambiente: por medio de la aplicación de los instrumentos mejoramiento continuo y 5 S, se garantiza la inexistencia o minimización de accidentes laborales o industriales, procura que todo el personal tenga la capacidad de prevenir y evitar riesgos, mantener unas condiciones adecuadas de higiene y seguridad en el puesto de trabajo y en las áreas productivas, al igual que pretende proteger y conservar el medio ambiente.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 160 - Plan maestro para la aplicación de una táctica TPM en una empresa

I. FASE: INTRODUCCIÓN PREPARACIÓN. (Etapa 1 a 5)	
	ETAPA 1. DECLARACIÓN DE INTRODUCCIÓN DE TPM La alta dirección de la compañía proclama su decisión de iniciar el proceso de aplicación del TPM.
	ETAPA 2. CAMPAÑA DE EDUCACIÓN EN TPM Se le da entrenamiento al personal de apoyo logístico y se hacen acciones de divulgación para todos los empleados.
	ETAPA 3. FORMACIÓN DE COMITÉS Y EQUIPOS TPM Se forman comités de promoción de TPM y se establecen los vínculos con otros departamentos de la compañía.
	ETAPA 4. FIJACIÓN DE PRINCIPIOS Y METAS Se hacen comparaciones con otras empresas respecto a las metas y se muestran los logros que se deben alcanzar al final.
	ETAPA 5. PREPARACIÓN DE UN PLAN MAESTRO El plan contempla la preparación, la evaluación de metas intermedias y la evaluación de objetivos a lograr al final de la implantación de cada pilar.
II. FASE: INICIO DE INTRODUCCIÓN (Etapa 6)	
	ETAPA 6. INAUGURACIÓN DE TPM Ceremonia donde participan todos los miembros de la compañía, proveedores, filiales y otros. La dirección de la compañía declara formalmente el inicio de la implementación.
III. FASE: EJECUCIÓN (Etapa 7 A 11)	
	ETAPA 7. ESTABLECER UN SISTEMA DE ALTO DESEMPEÑO ENFOCADO A LA PRODUCCIÓN Se inicia la realización de los cuatro pilares básicos: 1. Aumentar La Eficiencia En Los Procesos Y Equipos 2. Mantenimiento Autónomo 3. Mantenimiento Programado 4. Capacitación en la operación y mantenimiento de equipos
	ETAPA 8. ESTABLECER UN SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN PARA LA INCPORPORACIÓN DE NUEVOS EQUIPOS, PRODUCTOS O ELEMENTOS AL SISTEMA TPM
	ETAPA 9. ESTABLECER UN SISTEMA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD
	ETAPA 10. ESTABLECER UN PROCESO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA EN LAS ÁREAS DE ADMINISTRACIÓN Y SUPERVISIÓN
	ETAPA 11. ESTABLECER UN SISTEMA DE LA SEGURIDAD E HIGIENE (ISO 18000) Y DEL MEDIO AMBIENTE (ISO 14000)
IV. FASE: ESTABILIZACIÓN (Etapa 12)	
	ETAPA 12. IMPLEMENTACIÓN COMPLETA DE TPM EN EL LOGRO DE LAS METAS PROPUESTAS, BÚSQUEDA DEL PREMIO TPM Y REPLANTEAR NUEVOS OBJETIVOS - MONITOREO TOTAL DEL PLAN Y APLICACIÓN DEL TPM

EL *TPM* desempeña una labor importante en la motivación para la implementación de la primera táctica (es decir cuando se desea progresar del nivel dos operacional de mantenimiento e ingresar en el nivel táctico tres), es la base de otras tácticas como el *RCM* o la Proactiva, puede presentar algunas limitaciones cuando de equipos de alta tecnología, cuando de esto se trata se recomienda combinarla con *RCM* (Rath@, 1999) (Marks, 1997).

El *TPM* básicamente usa las acciones correctivas, modificativas, preventivas y esporádicamente las predictivas (es el *RCM* quien enfatiza más en estas). Es una táctica netamente de perfil humanista, sirve para empresas con situaciones difíciles en el recurso humano en producción y mantenimiento, es una metodología ideal para empresas en proceso de crecimientos rápidos y con deficiencias en el clima organizacional.

6.4.1.2 RCM - Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad

El *RCM* encuentra sus raíces a principios de los años sesenta; inicialmente es desarrollado por la industria de la aviación civil norteamericana; el primer esfuerzo serio lo promulga la *ATA (Air Transport Association*) en Washington (USA) en 1968, conocido como informe MSG1; posteriormente actúa el departamento de defensa de USA y, por comisión, F. Stanley Nowlan y Howard Heap escriben por primera vez su trabajo bajo el nombre de *Reliability Centered Maintenance* en 1978 (publicación de United Airlines por el Ministerio de Defensa de los Estados Unidos), que procura optimizar los factores humanos y productivos alrededor del mantenimiento. El estudio MSG2, primero, y el MSG3, promulgado en 1980, han permitido la divulgación de la metodología

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(Moubray, 2004). El *RCM* se puede definir como un proceso usado para determinar lo que debe hacerse para asegurar que cualquier recurso físico continúe realizando lo que sus usuarios desean que realice en su producción normal actual (Moubray@, 2001).

La filosofía del *RCM* se fundamenta en:

- Evaluación de los componentes de los equipos, su estado y su función.
- Identificación de los componentes críticos.
- Aplicación de las técnicas de mantenimiento proactivo y predictivo.
- Chequeo en sitio y en operación del estado corpóreo y funcional de los elementos mediante permanente revisión y análisis.

El mantenimiento centrado en confiabilidad es una filosofía de gestión de mantenimiento, que sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias a los activos más importantes de un contexto operacional.

Esta no es una fórmula matemática y su éxito se apoya principalmente en el análisis funcional de las fallas de un determinado contexto operacional, realizado por un equipo de trabajo multidisciplinario, el cual desarrolla un sistema de gestión de mantenimiento flexible que se adapta a las necesidades reales de mantenimiento de la organización, tomando en cuenta la seguridad personal, el ambiente, las operaciones y la razón costo / beneficio (Jones, 1995).

El *RCM* es una técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento para desarrollar programas organizados que se basan en la confiabilidad de los equipos en función del diseño y de la construcción de los mismos. El *RCM* asegura un programa efectivo de mantenimiento que se centra en que la confiabilidad original inherente al equipo se mantenga (Marks, 1997).

Los objetivos del *RCM* son los siguientes:

- Eliminar las averías de las máquinas.
- Suministrar fuentes de información de la capacidad de producción de la planta a través del estado de sus máquinas y equipos.
- Minimizar los costos de mano de obra de reparaciones, en base a un compromiso por parte de los responsables del mantenimiento en la eliminación de fallas de máquinas.
- Anticipar y planificar con precisión las necesidades de mantenimiento.
- Establecer horarios de trabajo más razonables para el personal de mantenimiento.
- Permitir a los Departamentos de Producción y de Mantenimiento una acción conjunta y sincronizada a la hora de programar y mantener la capacidad de producción de la planta.
- Incrementar los beneficios de explotación directamente mediante la reducción de los presupuestos del departamento de mantenimiento.

El *RCM* tiene numerosas ventajas en cuanto al aumento de la disponibilidad y confiabilidad de la maquinaria; a continuación se mencionan las más importantes:

- Crea un espíritu altamente crítico en todo el personal (operaciones o mantenimiento) frente a condiciones de falla y averías.
- Logra importantes reducciones del costo del mantenimiento.
- Optimiza la confiabilidad operacional, maximiza la disponibilidad y/o mejora la mantenibilidad de las plantas y sus activos.
- Integra las tareas de mantenimiento con el contexto operacional.
- Fomenta el trabajo en grupo (convirtiéndolo en algo rutinario).
- Incrementa la seguridad operacional y la protección ambiental.
- Optimiza la aplicación de las actividades de mantenimiento tomando en cuenta la criticidad e importancia de los activos dentro del contexto operacional.
- Establece un sistema eficiente de mantenimiento preventivo.
- Aumenta el conocimiento del personal tanto de operaciones como de mantenimiento con respecto a los procesos operacionales y sus efectos sobre la integridad de las instalaciones.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Involucra a todo el personal que tiene que ver con el mantenimiento en la organización (desde la alta gerencia hasta los trabajadores de planta).
- Facilita el proceso de normalización a través del establecimiento de procedimientos de trabajo y de registro

(Moubray, 2004).

Las limitaciones del *RCM* radican más que todo en el factor humano con que cuenta la organización, ya que de éste depende el éxito de la metodología. En este punto el equipo natural de trabajo juega un papel muy importante, debido a que será este el único responsable de divulgar de manera correcta y eficiente esta filosofía de manera que las personas involucradas con el *RCM* no vean este cambio como un problema, sino como una solución a sus problemas[259].

El equipo natural de trabajo será quien defina a qué equipos y componentes se les aplicara dicha filosofía, ya que no se puede esperar aplicar *RCM* a toda una planta y a todos sus equipos pues sería un proceso demasiado lento e inoficioso. Por todo lo mencionado anteriormente se debe tener demasiado cuidado a la hora de seleccionar correctamente las personas que conformaran el equipo natural de trabajo (Moubray@, 2001).

Ilustración 161 - Beneficios del mantenimiento centrado en confiabilidad

Calidad	Tipo de Servicio	Costo	Tiempo	Riesgo
Aumenta la disponibilidad en al menos un 8%, por el sólo hecho de implementar. Elimina las fallas crónicas y elimina las causas raíces. Aumenta la flexibilidad operacional. La programación de mantenimiento se basa en hechos reales. Proporciona el completo conocimiento de las fallas reales y potenciales de las máquina, así como de sus causas.	Proporciona un mejor clima organizacional para el trabajo en equipo. Ayuda a entender mejor las necesidades y los requerimientos de los clientes. Disminuye las paradas imprevistas. Genera un ambiente de investigación y desarrollo alrededor de los análisis de fallas.	Reduce los niveles de mantenimiento al menos en un 40%. Optimiza los programa de mantenimiento. Reduce los costos planeados o no de mantenimiento al menos en un 40%. Alarga la vida de los equipos para propósitos especiales. Todas las actividades de mantenimiento se analizan en un contexto de costo / beneficio.	Mejora los tiempos medios de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad al menos en un 25%. Aumenta los tiempos de funcionalidad de los equipos al menos en un 150% en promedio. Reduce o elimina los tiempos de demora en suministros o búsqueda de recursos o repuestos. Jerarquiza las actividades de mantenimiento, logrando su reducción en el tiempo.	Brinda seguridad e integridad ambiental en todo el desarrollo del proceso, a niveles muy superiores de los que se tienen antes de implementarlo. Las fallas con consecuencias sobre el medio ambiente o la seguridad son las que más se atacan y eliminan. Reduce al mínimo la posibilidad de fallas en cadena o superpuestas. Su razón de calificación al riesgo la hace como una de las tácticas más seguras.

(Mora, 2007a)

Las siguientes son algunas acciones que se pueden diferenciar dentro del *RCM*:

- Acción correctiva: reparación o reemplazo sobre las fallas. El costo de control o detección de fallas excede los beneficios.
- Acción preventiva: reparación o reemplazo sobre tiempos o ciclos.
- Acción predictiva: se emplean condiciones de monitoreo para detectar fácilmente etapas de falla. Reemplazo o reparación sobre condición.
- Además de estas acciones, el mantenimiento centrado en la confiabilidad (*RCM*), combina algunas actividades del mantenimiento proactivo para detectar y analizar la presencia de algunas causas de falla reduciéndolas en un período determinado (Troyer@, 2001).

El *RCM*, es una táctica procedimental que basa su esquema en el permanente cuestionamiento de las actividades de mantenimiento, sigue un proceso lógico y coherente que tiene normas; las preguntas a que da lugar son:

- ¿Funciones y parámetros asociados al equipo en su ambiente operacional normal actual?
- ¿De qué manera puede fallar y no cumplir las funciones anteriores?
- ¿Cuál o cuáles son las causas inmediatas o básicas? - ¿Cuál es su causa raíz?
- ¿Qué pasa y qué impactos genera cada falla funcional?
- ¿Cuál es la importancia de cada falla?
- ¿Cómo se puede predecir, prevenir o eliminar cada falla?

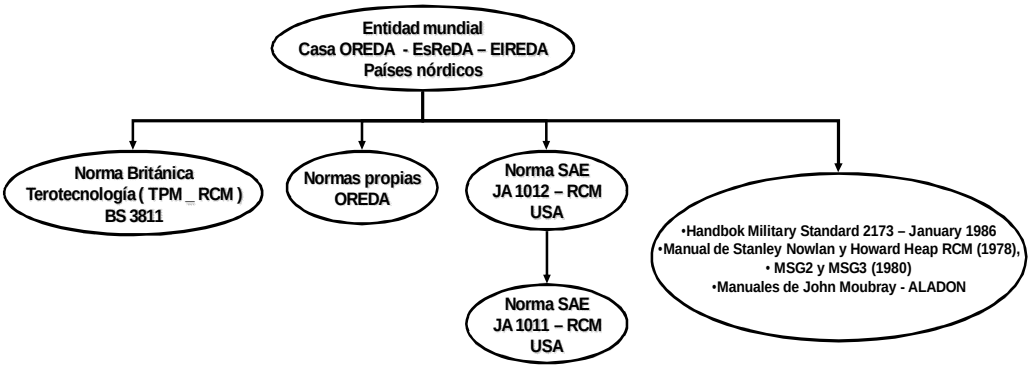
[259] *Existen desarrollos que permiten evaluar la labor del RCM como un proceso empresarial, con índices para cada una de sus actividades, se conoce como RCM Balanced Scorecard (Blitz@, 2005).*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- ¿Qué controles se deben ejecutar para controlar la falla, si no hay tareas que permitan anticiparse a ella o desaparecerla?

Existen varios procedimientos de orden universal que plantean las normas y reglas que rigen la implementación del *RCM*, en sí son procedimientos parecidos, algunos con mayor validez o no, pero en el fondo apuntan a unos propósitos generales comunes.

Ilustración 162 - Algunas de las normas que gobiernan el RCM, son



El autor, presenta en el CD adjunto un modelo tipo ensayo sobre la unificación de normas, que pretende mostrar los elementos básicos y fines comunes de algunas de estas normas sobre *RCM*, puede verse en Programa de CD 18 – Vídeo *RCM*

Programa de CD 23 - Vídeo RCM[260]

El desarrollo para la aplicación del *RCM*, tiene en cuenta lo siguiente:

Ilustración 163 - Etapas de aplicación del RCM

Pasos para la implementación

1. **Formación del equipo natural de trabajo**
2. **Selección y definición de las áreas y equipos restricción donde se implementará el RCM**
3. **Definición de criticidad y selección de los sistemas críticos, estableciendo sus Funciones primarias, secundarias, auxiliares y de apoyo logístico**
4. **Análisis de los fallas funcionales reales o potenciales para cada una de las funciones**
5. **Realización del análisis de los modos y de los efectos de las fallas, para determinar los modos de fallos a que se tiene lugar en cada falla funcional para cada función (utiliza el procedimiento FMECA)**
6. **Selección de las estrategias y procedimientos de mantenimiento (árbol lógico de decisión)**
7. **Implantación y evaluación del CMD en cada caso**
8. **Asigna estrategias y los recursos adecuados para el plan general de priorización asignado con base en el RPN y los costos / beneficios asociados a cada modo de falla**
9. **Revisión y monitoreo periódico de todo el esquema general y específico**

[260] *Para poner en ejecución el Vídeo de RCM, accione primero el archivo denominado autorun.exe, una le aparezcan las primeras imágenes en htlm, en la pantalla arriba a la izquierdo, le aparece un cuadro de fondo gris con línea superior verde, donde dice producido por Alberto Mora G. RCM Mil St 2173, coloque el mouse en el centro del lado izquierdo de este recuadro y le aparecerá una pequeña mano, donde le sale un letrero pequeño reproducir, haga allí doble click izquierdo del mouse y empezará la presentación.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Programa de CD 24 - Aplicación RCM fundamentada en normas SAE JA 1011 y 1012

La utilización del procedimiento *RCM*, se logra al ejecutar cada una de las siguientes etapas:

Ilustración 164 - Pasos del procedimiento individual RCM (archivo RCM.xls del CD adjunto)

1 - Numere Tabla RCM
2 - Ingrese Código Activo
3 - Defina Prioridad del Activo
4 - En la Hoja 1 Funciones Primaria Secundaria introduzca todas las funciones relevantes a evaluar
5 - En la Hoja 2 - Fallas Funcionales asigne todas las Fallas funcionales a cada Función descrita
6 - En la Hoja 3 - Modos de Fallas asigne estos a cada Falla Funcional enunciada
7 - En la Hoja 4 - Cálculos asigne las calificaciones respectivas de Severidad y Ocurrencia desde la columna H hasta la O inclusive, siguiendo las tablas y opciones mostradas, en las selecciones múltiples de cada casilla, valore esto para todos los modos de falla de cada falla funcional en todas las funciones
8 - En la Columna R de la Hoja 4 - Cálculos asigne la clase de Falla según las opciones OREDA descritas en la opción múltiple dentro de la casilla
9 - Ejecute la Macro Priorizar de la columna U de la Hoja 4 - Cálculos. El resultado obtenido es el Plan de Acción jerarquizado con base en el valor del Riesgo
10 - Organice el Árbol lógico de Reparaciones y Mantenimientos a ejecutar sobre las Fallas, en la zona entre las columnas AA hasta AK de tal manera que se pueda realizar en forma lógica y coherente, acorde a los recursos disponibles
11 - Una vez ejecutadas todas las acciones de mantenimiento, se debe volver a calificar los criterios de Severidad y Ocurrencia desde la columna AN hasta AU, luego se ejecuta la Macro Priorizar de la columna BA de la Hoja 4 - Cálculos, para conocer los nuevos valores de riesgo
12 - Se asignan los valores de Costos y de CMD en las columnas BF a BM de la Hoja 4 - Cálculos para determinar los parámetros estratégicos y encontrar los beneficios obtenidos con el RCM
13 - Reinicia el proceso después de un tiempo prudencial

Para la realización del ejercicio integral y específico del *RCM*, se puede utilizar el modelo de ayuda *RCM* y el organizador, que se encuentran en el CD adjunto con las denominaciones Programa de CD 25 - Formato Word RCM y el programa CD 26 – Organizador *RCM* o *FMECA*.

Programa de CD 25 - Formato Word RCM

Programa de CD 26 - Organizador RCM o FMECA

El *RCM* utiliza los cuatro tipos de acciones (correctivas, modificativas, predictivas, preventivas) descritas anteriormente (nivel dos de mantenimiento), utiliza la mayoría de los instrumentos avanzados específicos de orden técnico y se apoya en la mayoría de herramientas básicas y avanzadas genéricas, esta es la gran diferencia con el *TPM*, este último es de enfoque social humanista mientras que el *RCM* es básicamente de corte técnico, el *TPM* es más humano mientras que el *RCM* es más frío y mucho más técnico.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 165 - Etapas en la implementación global del RCM

1 - Planeación	**1.Activos físicos a trabajar bajo RCM**
	2.Definir recursos físicos y humanos requeridos
	3.Definir cronograma de entrenamiento, realización, análisis, fecha y lugar de las Personas
	4.Estudiar integral y específicamente cada activo
2 - Grupos de Realización y Revisión	**1.Debe haber personal de operación, mantenimiento e ingeniería de fábricas y de otras dependencias que soporten el proceso.**
	2.Los núcleos o grupos primarios deben al menos tener seis personas: ingeniero supervisor de mantenimiento, ingeniero supervisor de producción, operario, mantenedor, experto externo y facilitador (preferiblemente externo)
3 - Facilitadores	**1.Análisis exhaustivo y excluyente con todo: funciones, fallas funcionales, modos de falla, tareas, etc. en todos los equipos críticos y elementos claves**
	2.RCM entendido por todos
	3.Método del Vaticano por consenso en forma rápida y ágil, con dosis motivacional
	4.Calendario de trabajo con cumplimientos
4 - Resultados de análisis RCM	**1.Planes de mantenimientos y reparaciones a ser efectuados**
	2.Rediseño de procesos de operación, validados, entendidos y practicados por quienes ejecuten
	3.Involucrar los mantenimientos en el CMMS o programas manuales.
	4.Tareas descritas a cabalidad con conocimiento de causa de quienes las practican y practicarán.
	5.Modificaciones, con cálculos y estudios, responsables y fechas.
	6.Control de seguimiento de tareas y operaciones nuevas o rediseñadas en frecuencia
5 - Auditoría e implementación	**1.Revisión integral de nivel gerencial por cada activo terminado**
	2.Auditoría, costos, CMD
	3.Revisión a la luz de las normas internacionales SAE JA1011, SAE JA1012, OREDA, Military Standard 2173 y British Norm Standard 3188
	4.Beneficios, limitaciones, cambios y su nueva aplicación
	5.Revisión cada dos años de los activos con modificación o cambios en calidad repuestos, bajo control de la curva de Davies o de la Bañera

(Mora, 2007b)

La aplicación del *RCM* es muy útil en empresas con un gran clima organizacional, donde el recurso humano es motivado y consciente de la importancia del trabajo en equipo de mantenimiento y producción alrededor de las máquinas. Esto hace posible aplicar el *RCM* sin tener que haber desarrollado en forma previa el *TPM*, pero se requiere ese componente humano muy desarrollado en la empresa donde se desea aplicar el *RCM* sin el *TPM*. Es muy recomendable que la organización esté madura en los niveles uno y dos de mantenimiento con al menos unos cinco años de experiencia para luego proceder a instalar alguna táctica.

6.4.1.3 Mantenimiento combinado TPM & RCM

La combinación *RCM* y *TPM* tiene la ventaja de mejorar el proceso para facilitar el trabajo en equipo entre mantenimiento y las funciones de producción, mejorar la fiabilidad de las máquinas y bajar los costos de operación. Ambas tácticas son excluyentes y complementarias, mientras el *TPM* mejora la productividad el *RCM* aumenta la confiabilidad y la competitividad (Marks, 1997) (Moore@, 2008).

Los pilares básicos del *TPM* y algunos pensamientos sobre su relación con una estrategia *RCM* son:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- El *TPM* trata de restaurar el equipo a una condición parecida a la nueva. Las buenas prácticas de *TPM* ayudan a reducir al mínimo las fallas que ocurren en la etapa de mortalidad infantil, durante la instalación y puesta en marcha o a partir de estas; con la restauración del equipo y el cuidado básico por parte del operador; mientras el *RCM* erradica o controla las fallas.

- El *TPM* contribuye a la participación del operador en el mantenimiento del equipo. Sin embargo, el operador necesita el trabajo de especialistas cuando el problema en la maquinaria implica tecnologías más avanzadas, estos especialistas usan los principios del *RCM* para analizar los modos de fallas y sus efectos, además, usan herramientas de monitoreo de condición como el análisis de vibraciones y otros instrumentos avanzados de mantenimiento que facilitan la identificación de la causa del problema.

- El *TPM* procura mejorar la eficacia y la eficiencia del mantenimiento, al igual que el *RCM*.

- El *TPM* exige que las personas se entrenen para mejorar sus habilidades de trabajo, mientras que el *RCM* ayuda a identificar las fallas del personal e indica las áreas que requieren entrenamiento.

- El *TPM* usa el control y la prevención del mantenimiento. Esto es inherente en *RCM* que se encarga de identificar y evitar los modos de falla.

- El *TPM* intensifica el uso del mantenimiento preventivo, el *RCM* lo complementa al utilizar intensivamente el predictivo. El *RCM* ayuda a identificar cómo y cuándo usar el mantenimiento preventivo o predictivo a través del análisis de los modos de falla.

- La combinación de ambas modalidades de mantenimiento es una costumbre que se incrementa día a día en las empresas modernas, para mejorar y conservar los equipos y sus funciones. Con la combinación de ambas tácticas complementarias se logra evitar crisis y fallas en el proceso productivo, se minimizan los costos y se mejoran constantemente los procesos de planta. La relación clave entre *TPM* y *RCM* estriba en que sus principios claves de organización y confiabilidad se combinan para garantizar una excelente operación y gestión de mantenimiento. El *RCM* sirve para determinar los requerimientos de mantenimiento para operaciones físicas con su correspondiente contexto operativo tecnológico y con el *TPM* se logra que estos requerimientos se difundan como los más efectivos y económicos (Geraghty, 1996).

La utilización conjunta de ambas tácticas permite alcanzar un manejo intensivo y exitoso de los instrumentos básicos y avanzados de mantenimiento, en especial del recurso humano (*TPM*) y de la tecnología (*RCM*), su utilización progresiva al iniciar con *TPM* para lograr la superación del recurso humano, y luego el énfasis técnico y logístico del *RCM*, permiten una utilización extensiva de los dos niveles iniciales de mantenimiento. La combinación ideal es implementar el *TPM* y una vez logrado seguir con *RCM*, para posteriormente ingresar en una táctica proactiva (que las cobija a ambas) (Marks, 1997).

6.4.1.4 Mantenimiento Proactivo

El mantenimiento proactivo es una táctica de mantenimiento, dirigida fundamentalmente a la detección y corrección de las causas que generan el desgaste y que conducen a la falla de la maquinaria. Una vez que las causas que generan el desgaste han sido localizadas, no se debe permitir que éstas continúen presentes en la maquinaria ya que, de hacerlo, su vida y desempeño se ven reducidos. La longevidad de los componentes del sistema depende de que los parámetros de causas de falla sean mantenidos dentro de límites aceptables, utilizando una práctica de detección y corrección de las desviaciones según el programa de proactivo. Límites aceptables significa que los parámetros de causas de falla están dentro del rango de severidad operacional que conducirá a una vida aceptable del componente en servicio.

El proactivo se define como la metodología en la cual el diagnóstico y las tecnologías de orden predictivo son empleados para lograr aumentos significativos de la vida de los equipos y disminuir las tareas de mantenimiento, con el fin de erradicar o controlar las causas de fallas de las máquinas. Mediante este mantenimiento lo que se busca es la causa raíz de la falla, no sólo el síntoma. El proactivo representa el próximo paso en la evolución hacia un mantenimiento planeado y dentro de este procedimiento el personal de mantenimiento lleva estadísticas específicas sobre los equipos por monitorear para cumplir con los requerimientos necesarios (Fitch@, 2002).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La táctica proactiva evita elevados costos de inversión en mantenimiento de maquinaria y en la reposición de la misma. Haciendo una analogía con el cuerpo humano, imagínese poder localizar y eliminar una enfermedad mucho antes de que los síntomas aparezcan en el cuerpo, lo que ahorra dinero en cuentas de hospitales y médicos y mantiene al paciente en buen estado de salud por un largo periodo de tiempo. Ésta es la ventaja del proactivo sobre otras tácticas (Diagnetics@, 1998.).

La revista "Fluidos, oleohidráulica, neumática y automación" de la organización *Oiltech Análisis*, en su artículo titulado Mantenimiento Proactivo de Sistemas Mecánicos Lubricados, publica:

> "….La causa raíz de las fallas resulta a partir de que una o más condiciones del sistema no estén normales, y causa una situación inestable en éste. Las condiciones no estándares que dan lugar a las fallas en sistemas mecánicos son las siguientes: excesiva contaminación del fluido, fugas del fluido, inestabilidad química, inestabilidad física, cavitaciones, inestable temperatura del fluido, condiciones severas de desgaste, desbalanceo, desalineación, deformación de materiales, entre otros. Si se asume que el fabricante diseña y construye la máquina en forma correcta, cualquier falla en la máquina puede ocurrir sólo cuando una de las causas raíz enunciadas anteriormente suceda.
>
> Por lo tanto, la falla condicional depende totalmente de la existencia de una o más causas raíces en estado inestable en el sistema, en este estado condicional no se produce todavía una degradación del material; por lo tanto, el usuario no puede emplear ningún instrumento avanzado o técnico específico de mantenimiento (desgaste, vibraciones, etc.), que pueda predecir o detectar condiciones no estándares en el sistema. El usuario puede arreglar el estado inestable de las causas raíces de las fallas mediante técnicas proactivas. Como además no ha ocurrido ningún problema en el material, el usuario puede eliminar la causa de la inestabilidad y romper la cadena que conduce a la falla catastrófica.
>
> Cuando ocurre una falla incipiente, se produce una degradación de material, pero no se alcanza un estado en el cual el sistema se vea afectado. En otras palabras, el operario no es consciente de la pérdida de productividad del sistema. La única evidencia de la degradación del material que puede prevenir el desgaste, el ruido y/o las vibraciones es la metodología proactiva.
>
> Si el usuario no ha corregido las causas raíces de la falla detectada, ésta es inminente. En este estado de falla el material se encuentra dañado y el rendimiento de la máquina es bajo.
>
> Cuando la máquina alcanza este estado, el operario debe programar acciones planeadas de mantenimiento lo más pronto posible para evitar averías por rotura e intervenciones no planeadas.
>
> En el caso de ignorar cualquier degradación del material o pérdida de rendimiento lo más probable es que ocurra una falla en forma precipitada de la máquina. Éste es un estado en el cual la degradación del material llega a ser grande, los elementos irreparables y la pérdida de comportamiento alta. En estas condiciones, la falla está al alcance de la mano y el sistema debe ser parado y revisado.
>
> Finalmente, si se continúa la operación del equipo, se produce la falla catastrófica, donde la máquina pierde la funcionalidad y se requiere una reparación mayor de carácter urgente para que pueda volver a producir bienes o servicios…." (Oiltech, 1995).

El mantenimiento proactivo utiliza las acciones correctivas de acuerdo con la criticidad encontrada y con sus efectos potenciales en los sistemas (Klusman, 1995), desarrolla acciones predictivas y preventivas de mantenimiento para detectar y analizar las causas de falla. A su vez, estas acciones incluyen un rediseño o modificación de los equipos para prevenir o eliminar los problemas una vez ocurran (Piotrowski@, 2001).

Proactivo recibe mucha atención en el mundo entero como uno de los medios más importantes para lograr ahorros insuperables por técnicas convencionales de mantenimiento. Al sustituir una filosofía reactiva del mantenimiento por una proactiva se evita seguir en las condiciones no estándares de falla y el desgaste prematuro de los equipos (Fitch@, 2002).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La integración de herramientas del *TPM* y *RCM* (que pueden utilizarse individualmente o en forma combinada) se logra mediante la táctica proactiva.

Conjuntamente con el *TPM* y el *RCM* también se utiliza la mayoría de instrumentos básicos (en especial información, recurso humano, tecnología, información, planeación, etc.) y avanzados genéricos y específicos (particularmente todos los asociados a fallas), también maneja los indicadores CMD, con lo cual se puede deducir que es una táctica integradora de *TPM*, *RCM* y *TPM* & *RCM* en el tiempo (Klusman, 1995).

Los tres pasos para la implementación de la táctica proactiva, según *Tribology Data Handbook*[261], con el fin de lograr el éxito de la aplicación y lograr sus inmensos beneficios, son:

- Fijar metas o estándares basados en el análisis de causa raíz de las fallas; ya que por definición proactivo implica constante análisis, monitoreo y control de las fallas y de su causa raíz.
- Mantener el control de la causa raíz y conservarla en el tiempo de una manera sostenible es el segundo paso.
- El tercer paso es la permanente vigilancia microscópica de los elementos de control de la causa raíz, manteniéndola dentro de las condiciones estándares y evitando de una manera disciplinada que ésta salga de ella.

Ilustración 166 - Estructura Proactiva empresarial

Filosofía o Táctica de Mantenimiento	***Táctica de Mantenimiento Proactivo***	
Categorías del Mantenimiento	Acciones Preventivas	Correctivas
Divisiones categóricas del Mantenimiento – Acciones o Tareas	Planificado Predictivo Basado en Condición	Averías Reparaciones
Organización	Planeado	No planeado
Plan presupuestal	Normal	Gastos Extras

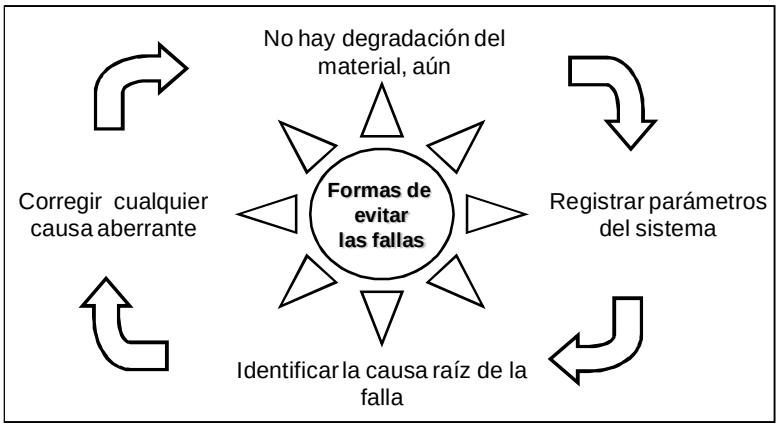
SKF, enumera cuatro pasos en las aplicaciones de la táctica proactiva:

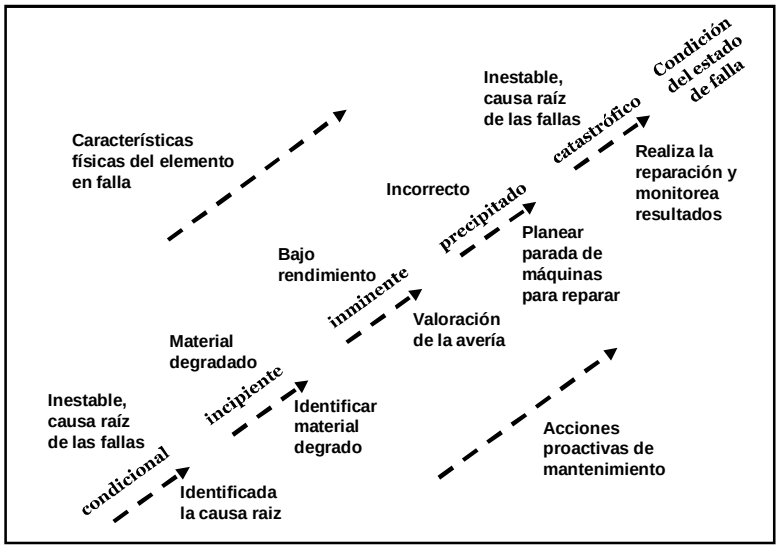
- Establecimiento de un sistema planeado de mantenimiento basado en confiabilidad y en el recurso humano, con utilización intensiva de métodos predictivos y preventivos.
- Diagnósticos y análisis de la causa raíz.
- Mejora a través de Indicadores Clave de Rendimiento (KPI).
- Proceso de medición, revisión y monitoreo integral de la gestión y operación industrial.

[261] *Tomado de la página web en internet http://www.noria.com/secure/product_detail.asp?catalogid=76 del autor E. Richard Bóxer, de la editorial CRC Press de 1997.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 167 - Ciclos de vida y actividades de la táctica proactiva





(Mora, 2007b)

Los principales objetivos del mantenimiento proactivo son identificar y eliminar las causas básicas, inmediatas y raíces de las fallas. Es una táctica que trata de frenar las causas inmediatas por fallas incipientes en los sistemas o máquinas. El operario puede revisar todos los parámetros para determinar la estabilidad de la máquina e identificar si existen condiciones de falla. Es realmente una nueva dimensión dentro de la tecnología del mantenimiento. Requiere que el personal tenga un alto nivel de conocimiento y familiarización con la máquina.

El personal debe entender los principios de funcionamiento y características de la máquina, con el objeto de identificar las causas raíces de la falla. En otras palabras, el personal de mantenimiento debe estar entrenado para reconocer condiciones defectuosas de funcionamiento.

El resultado que produce la implementación de una táctica proactiva, es que crea en la empresa un cambio en la conducta y es el generador de innumerables ahorros para las empresas, con lo cual sufraga su instalación e implementación y genera situaciones positivas como: mejor imagen del cliente, mayor garantía de calidad de los equipos, superior confiabilidad en los equipos, alta seguridad y gran economía en los costos (Oiltech Analysis,1995,361-368).

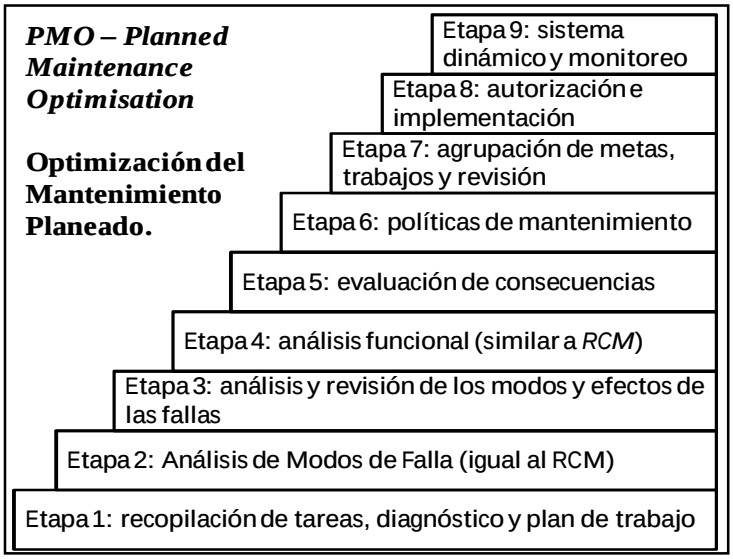
Las tareas proactivas (Moubray, 2004) están en el nivel dos de mantenimiento, el tratamiento de la táctica proactiva se logra al aplicar los conceptos enunciados con todas sus reglas, normas y condiciones expuestas en el nivel tres de mantenimiento.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

6.4.1.5 Táctica PMO – Planned Maintenance Optimisation

El *PMO*, aparece como una interesante opción, donde no se ha logrado implementar muy bien el *RCM* por su complejidad, el *RCM* está muy en equipos o máquinas nuevas o que inician en una planta y en yuxtaposición el *PMO* es ideal para equipos o máquinas en funcionamiento.

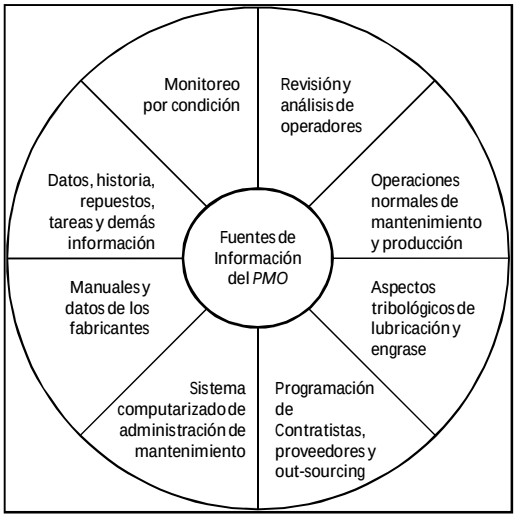
Ilustración 168 - Pasos del PMO



EL *PMO* es una metodología basada en el largo plazo y que trata el mantenimiento como un proceso y no como una función o división dentro de la compañía. Pretende en general mejorar la confiabilidad, la mantenibilidad, la confiabilidad y reducir las horas de trabajo necesarias para atender las necesidades de mantenimiento.

Un pilar fundamental del *PMO* es el buen manejo de la información, en los aspectos de: la recolección, el manejo y la obtención en tiempo real; requiere de excelente información para determinar los análisis de fallas tanto a nivel de función, falla funcional, modos de fallas, efectos y consecuencias de las mismas. Aparte de que trabaja a partir de varios sistemas de planeación y programación de las tareas de mantenimiento, exige que toda la información sea sistematizada y centralizada en una sola plataforma de información, contenido todos los parámetros de personal, administración y demás datos pertinentes sobre el recurso humano y los equipos (Turner@, 2007).

Ilustración 169 - Orígenes de la información en PMO



Las acciones en que más se apoya el *PMO* son las de tipo planeado (preventivas y/o predictivas) y exige el trabajo multidisciplinario en equipo para alcanzar sus objetivos. Estos, deben tener un estricto seguimiento, monitoreo y control, hasta su total culminación e implementación.

La eficacia del *PMO* se fundamenta en los sistemas de gestión y operación del mantenimiento, bajo un enfoque de proceso, lo cual garantiza que no haya: dualidad de funciones en los departamentos, metas comunes, grupos poco efectivos de trabajo, demasiado roles y funciones en el personal de mantenimiento y producción, demasiada especialización en la realización de los análisis, control y eliminación de fallas (donde la mayoría del recurso humano, practica estas metodologías), bases de datos independientes para cada uno de los departamentos (administración, recursos humanos contabilidad, finanzas, inventarios, almacenes, compras,

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

mantenimiento, producción, etc.); sino que todo esté en una misma plataforma de información.

La columna vertebral del *PMO* es el tratamiento y análisis estadístico de la información histórica y presente, en tiempo real, esto exige que la información se maneje de una forma exquisita y eficiente. A pesar de que el *PMO* y el *RCM*, manejan modos de fallas, son mucho más simples en el primero y más fáciles de controlar.

El *PMO* es un proceso constante de revisión y monitoreo de todas las actividades y tareas relevantes de mantenimiento, mientras que el *RCM* es un programa rígido y duro de constante trabajo; en general el *PMO* es más flexible y efectivo que el *RCM* (Turner, 2005) (Johnson, 1995).

En general se puede considerar el *PMO* como opción seria e interesante frente a la robustez del *RCM*, dado que el *PMO* es más efectivo porque solo analiza las fallas y modos de fallas relevantes (y no los insignificantes o indiferenciados), trabaja con equipos en funcionamiento y es mucho más fácil de implementar.

6.4.1.6 Decisiones conjuntas o múltiples sobre tácticas

La opción de seleccionar alguna o varias de las cuatro tácticas genéricas expuestas hasta el momento se debe basar en las expectativas y nivel de desarrollo de la empresa; si el caso es una empresa que desea tener una táctica rápida y eficiente con un buen desarrollo en los niveles uno y dos de mantenimiento puede optar por las mejores prácticas del TPM o su implementación completa, si se está en la situación de una empresa que desea aplicar RCM directamente con un buen clima organizacional puede optar por las mejores prácticas del RCM o su implementación integral completa, si la organización quiere un desarrollo de mediano plazo (entre cinco y seis años) en su parte táctica puede decidir por el TPM & RCM combinados (contando que tiene desarrollados los niveles uno y dos de mantenimiento), pero si se desea un desarrollo de largo plazo con un mejoramiento continuo permanente a unos di o quince años vista, debe optar por una táctica proactiva, siguiendo cada una de sus etapas: TPM, RCM; TPM & RCM combinados y proactiva.

Es importante resaltar que la táctica proactiva tiene la condición de implementarse en etapas en el largo plazo, con lo cual llega a ser muy efectiva.

Las tácticas que se presentan a continuación son de tipo específico, para situaciones muy especiales y particulares:

6.4.1.7 Mantenimiento Reactivo

Christer Idhammar, en su artículo de la revista *Pima's Papermaker*, en la sección de mantenimiento de julio de 1997 (Idhammar, 1997a) (Idhammar@, 1999), escribe:

> "....en una organización de producción y mantenimiento mal constituidas, la organización reacciona frente a los problemas antes de prevenirlos. No hay tiempo para tomar medidas que rompan este esquema. Es más, cuando los equipos trabajan con problemas graves, el mantenimiento se vuelve lento y espera el próximo problema, lo que genera que entre los trabajos reactivos es poco lo que mantenimiento hace. Desde el punto de vista de operación, es una situación cómoda, ya que el mantenimiento puede atender problemas en los equipos de manera rápida...." (Idhammar, 1997a) (Idhammar, 1997b).

No debe entenderse la táctica reactiva como el conjunto de actividades que desarrolla una empresa para organizar sus acciones correctivas deficientes e inadecuadas[262], es una táctica interesante para aquellas organizaciones industriales y de servicio, que no permanecen mucho tiempo con sus equipos, que son desarrolladoras o usuarias de tecnologías avanzadas, que sus productos y áreas de negocio cambian constantemente, por lo cual necesitan crear una infraestructura y aprender habilidades y competencias que les permitan reaccionar rápidamente ante las nuevas fallas y situaciones complejas de mantenimiento; son empresas que tienen la particularidad de atender en

[262] *No es propiamente un mantenimiento correctivo mejorado, recuérdese que las acciones de mantenimiento correctivo son del nivel dos y la táctica es del tres, en esta sección se hace alusión a este nivel táctico de mantenimiento.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

forma oportuna las necesidades de mantenimiento. Ideal para empresas nuevas que no permanecen mucho tiempo con los mismos equipos (Beck@, 2003) (Chute@, 2003).

6.4.1.8 Mantenimiento orientado a resultados

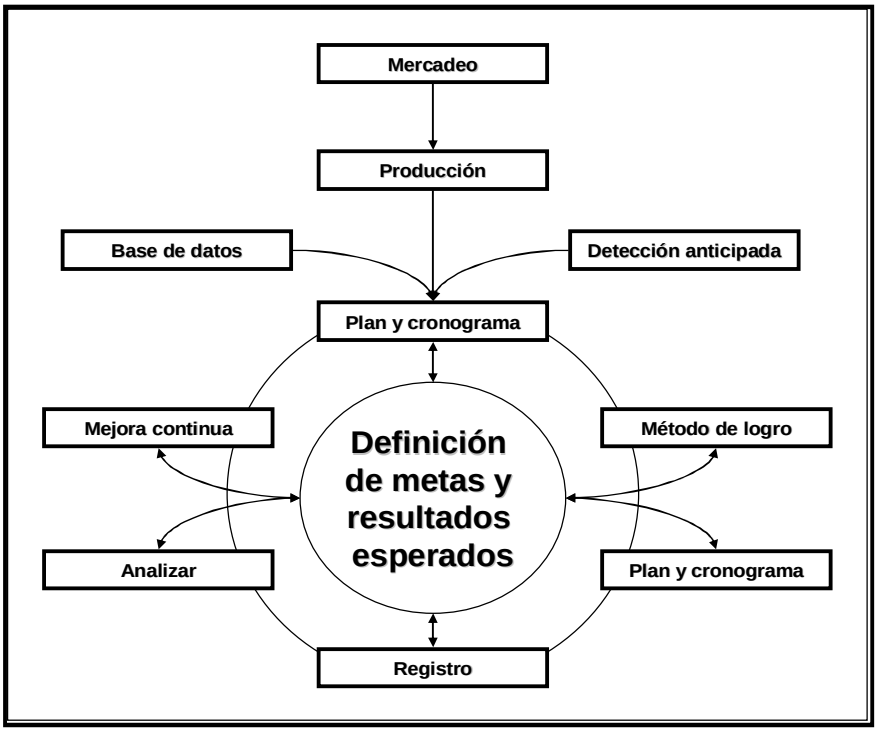
La táctica de mantenimiento orientado a resultados se basa en la intuición, en soluciones de sentido común para problemas recurrentes; por lo tanto es bastante usada por las personas con más habilidades dentro de la compañía. Cada departamento realiza una inversión en este proyecto, que se puede medir con la siguiente fórmula:

Ecuación 75 - Táctica hacia resultados

$$R = A * Q = \text{Resultado o Producto, } Q \text{ es la calidad de la idea y } A \text{ es el nivel de aceptación}$$

El concepto central de esta táctica es ver a mantenimiento como una actividad productiva de mejora continua (Idcon@, 2000)

Ilustración 170 - Líneas de acción de la táctica por resultados



Al orientar el mantenimiento a resultados puede resultar conveniente como táctica de mantenimiento, a empresas que no tienen mucho tiempo disponible para organizarse, su uso debe ser de orden temporal mientras se define por una táctica más estable, como las cuatro enunciadas[263] al principio de la sección. Si mantenimiento hace las cosas correctas y se dirige hacia el logro del cambio de la cultura organizacional, entonces la fábrica logra que esas cosas se hagan bien hechas.

En otras palabras, lo principal es hacer lo que se debe hacer; después de esto, la empresa debe aprender a hacer bien dichas cosas (Idhammar, 1997b).

Pero, se enfatiza que esta táctica solo se debe usar en casos de emergencia durante un tiempo limitado, ya que es dócil la planeación integral y el estudio completo del proceso de mantenimiento bajo este modelo administrativo de organización de mantenimiento. Su ventaja es que se centra en las necesidades finales del cliente, es decir en

[263] *TPM, RCM, TPM & RCM o Proactiva.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

mercadeo y desde allí desarrolla las metas o resultados que desea alcanzar.

6.4.1.9 Mantenimiento de clase mundial - World Class Maintenance – WCM

Un anhelo de las áreas de mantenimiento es llegar a ser una organización de clase mundial, lo cual denota y se define como el mantenimiento sin desperdicio, donde este es la diferencia entre cómo se realizan las diferentes acciones en la actualidad y el deber ser óptimo de las mismas.

Se basa en anticiparse a lo que suceda en el futuro, su función básica es convertir cualquier clase de reparación o modificación en actividades planeadas que eviten fallas a toda costa. Una organización de clase mundial no sólo se basa en el hacer, también en el pensar (Idhammar, 1997a) (Idhammar, 1997b) (Idhammar@, 1999).

La orientación de la gestión de mantenimiento hacia clase mundial exige cambiar de actitud y de cultura en la organización; requiere que se tenga un alto nivel de prevención y planeación, soportado en un adecuado sistema gerencial de información de mantenimiento (*CMMS*), muy orientado hacia las metas y objetivos fijados previamente y realizando las cosas que haya que hacer en la forma más correcta posible con el mayor grado de profundidad científica.

Utiliza el *benchmarking*[264] como herramienta para alcanzar mejores costos, mejor productividad y máxima competitividad a través del mejoramiento continuo (Boxwell, 1994).

Los pasos fundamentales para implementar una táctica de clase mundial son: planeación, prevención, programación, anticipación, fiabilidad, análisis de pérdidas de producción y de repuestos, información técnica y cubrimientos de los turnos de operación, todo ello soportado en una organización adecuada y apoyada por sistemas de información computarizado, con un cambio de actitud y cultura hacia el cliente (producción o cualquier departamento interno o externo que añada valor agregado) (Idhammar, 1997a).

Herman Ellis en su artículo sobre los principios de la transformación de la función de mantenimiento a las normas de categoría mundial de funcionamiento, describe textualmente (Ellis@, 1999):

> "…El mantenimiento de clase mundial representa los niveles de funcionamiento del mantenimiento. Al transformar el mantenimiento a uno de clase mundial se debe tener en cuenta sus principios básicos, el entrenamiento de la mano de obra enfocado hacia una nueva actitud de las personas involucradas en mantenimiento y la estratificación del mantenimiento. Si se quiere que la función de mantenimiento alcance sus objetivos y se desarrolle en categoría de clase mundial no se deben bajar las finanzas de sus sistemas de apoyo (administración del mantenimiento, instrumentos, piezas de recambio, planificación, control, cultura, etc.), ya que de las relaciones entre ellos depende la formación de una acción dinámica para establecer la función de mantenimiento firmemente sobre el camino para hacerla de clase mundial. La transformación de las personas (cambio de actitud) es uno de los puntos más complejos para implementar el *WCM*, ya que se deben entrenar en las profesiones específicas que se van a desarrollar en el *WCM* y se debe recompensar el esfuerzo hecho por estas personas…."

Algunos principios estratégicos que se deben tener en cuenta en la táctica de clase mundial, son:

- Es un proceso de largo plazo, no se deben esperar resultados inmediatamente.
- Implementar el mantenimiento de clase mundial sobre la situación real de la empresa.
- Los sistemas que se basan en cambios estructurales, culturales y organizaciones de la empresa, duran más tiempo y son de mediano y largo plazo.
- Un modelo bien estructurado simple es más efectivo que uno complejo, ya que es más duradero y necesita menos entrenamiento.

---

[264] *Francisco Rey Sacristán define benchmarking como "un método de ayuda a la mejora continua cuyo objetivo es llegar a desarrollar sobre el terreno las gestiones empresariales reconocidas como las mejores por el entorno empresarial mundial, con el fin de lograr incluso superarlas a través de la obtención de altas cotas de productividad y por tanto mantener un buen nivel de competitividad" (Rey, 1996). Es importante aclarar que a veces en mantenimiento se considera el utilizar índices de mantenimiento de otras organizaciones mundiales en forma comparativa, taxativamente hablando benchmarking es mucho más que eso, son procesos que pueden tomar hasta dos y tres años en el conocimiento de otras organizaciones. Existen varios tipos, entre ellos sobresalen: colaborativo, comparativo y competitivo; puede ser de orden interno entre dos o más departamentos de una misma empresa o externo con otras organizaciones.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Los cambios de actitud y cultura requieren mucha capacitación, entrenamiento y práctica por parte de las personas de la empresa.
- Mientras mejor sea la estrategia, mejores serán los resultados.
- Ninguna iniciativa de clase mundial debe ser lanzada de forma imprevista, urgente y con apremio.
- La táctica de clase mundial se centra en las normas y en la solución de problemas.
- El *WCM* requiere la estratificación del mercado objetivo en función de continentes, países, regiones, normas y costumbres.
- Debe haber un alto compromiso de los empleados y un alto nivel de apropiación de todas las personas que forman parte del proceso de clase mundial. Todas las personas que participan en la implementación de la táctica de clase mundial lo hacen en forma voluntaria, impulsados más por la motivación que por obligación.

Las empresas que están ubicadas en varios países o continentes en el mundo son las llamadas a utilizar intensivamente la táctica de clase mundial, esto las obliga a cumplir normas y tratados internacionales. Las organizaciones que siguen esta táctica normalmente se apoyan en leyes de clase mundial en mantenimiento como: OREDA, *AFNOR*[265], *British Standard*, EIREDA, *SAE*, Military Standard, ESREDA, ISO, DIN, ASME y muchas otras propias de regiones o países; es utilizada también por empresas que exportan gran parte de sus productos o servicios y se tienen que acoger a las normas de las naciones donde llevan sus bienes (Schultz@, 2005).

La táctica proactiva se fundamenta en la mayoría de instrumentos básicos, avanzados genéricos y específicos de orden técnico, usa los cuatro tipos de acciones del nivel dos de mantenimiento, se apoya en las mejores prácticas de las cuatro tácticas básicas de mantenimiento, pone en práctica las mejores costumbres encontradas a nivel internacional, mediante el *benchmarking*. Lo más aconsejable es que las organizaciones que deseen alcanzar el WCM tengan muy desarrollados los niveles uno y dos de mantenimiento, y al menos hayan puesto en la práctica una de las tácticas básicas de mantenimiento.

6.4.1.10 Mantenimiento Centrado en Habilidades y Competencias (Core Competences Maintenance)

Las organizaciones procuran que su recurso humano gane habilidades y competencias, como una excelente táctica para preservar el conocimiento y el buen servicio de mantenimiento, con el fin de elevar la posibilidad de controlar, erradicar o prevenir fallas en sus sistemas o equipos. La tendencia es a concentrar los departamentos de mantenimiento en pocas personas con muchas habilidades, conocimientos y competencias, con el fin de aumentar la efectividad en mantenimiento y utilizando la subcontratación para realizar las actividades no diferenciadas que no son claves en los procesos propios de la empresa.

El progreso constante de mantenimiento hacia niveles superiores de servicio con sus clientes internos o externos le permite desarrollar un proceso sostenido de obtención de habilidades, competencias y de generación de productos y servicios esenciales en mantenimiento, centrando la organización en la ciencia y no en la reparación de equipos.

La insistencia en que se enfoque la prestación del servicio no en marcas específicas ni en equipos definidos, sino en plantear el desarrollo de habilidades y conocimientos científicos alrededor de las ciencias que imperan en el servicio de mantenimiento de equipos (robótica, mecatrónica, electrónica, eléctrica, mecánica, hidráulica, lubricación, generación de potencia, neumática, termodinámica, química, etc.), conduce a mejores opciones futuras para el área.

Emulando el modelo de desarrollo japonés, donde se da prioridad al desarrollo científico de habilidades y competencias esenciales apoyados en la ciencia como la forma más sólida de alcanzar niveles de competitividad sostenible en el largo plazo y difíciles de imitar por parte de la competencia, el modelo de Japón permite visualizar que es más próspero procurar el desarrollo hacia las raíces de la ventaja competitiva que hacia los productos que se comercializan, apoyándose en el avance de la ciencia y en la acumulación específica de conocimientos.

[265] *Normas de Mantenimiento en Francia*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Las organizaciones desarrollan las habilidades y competencias esenciales en mantenimiento, que se les traducen en ventajas competitivas, en la capacidad de la dirección para trasladar a todos los niveles de la organización los conocimientos, las metodologías y las tecnologías para generar competencias profesionales que les permitan adaptarse fácil y rápidamente a cada una de las nuevas situaciones del entorno industrial mundial, de los mercados y de la sociedad empresarial en que se está (Prahalad, y otros, 1991).

La táctica centrada en competencias es también una técnica muy usada en la actualidad por diversas empresas de diferentes sectores, es una práctica que se puede poner en un uso indiferente del nivel en que se encuentre en mantenimiento. Se debe tener un buen clima organizacional y un excelente recurso humano motivado hacia el aprendizaje individual y colectivo.

6.4.1.11 Otras tácticas

Indiscutiblemente, existen muchas tácticas en mantenimiento que cumplen con su condición de basarse en normas y ser de uso internacional, hasta el momento se han sólo descrito algunas, como las más conocidas y usadas a nivel mundial, pero queda abierta totalmente la posibilidad de que existan otras o aparezcan nuevas tácticas en el futuro.

6.4.1.11.1 Propia

Se puede afirmar, que toda empresa que haya cumplido a cabalidad los niveles uno y dos de mantenimiento, posee una táctica propia para desarrollar todas las actividades de gestión y operación de mantenimiento, así no haya optado en forma oficial por alguna de las tácticas descritas (*TPM*, *RCM*; reactiva, proactiva, clase mundial, etc.); es decir el mismo hecho de que una empresa en mantenimiento utilice la mayoría de los instrumentos del nivel uno y entienda las diferencias de las acciones factibles de mantenimiento (planeadas o no), en el nivel dos la constituye en una táctica, si hace las cosas de una forma organizada, reglada, ordenada y coherente. La táctica propia basada en las mejores prácticas de otras puede llegar a constituirse en la mejor opción del nivel tres de mantenimiento, para cualquier empresa que cumpla adecuadamente los niveles uno y dos(Mora, 2007b).

Las tácticas como tal no son ni buenas ni malas, solo en el nivel cuatro se puede valorar lo apropiadas que son para el logro de los objetivos propuestos, acordes a la misión, la visión y las circunstancias propias de la empresa que las desarrolla; ahora, lo que sí puede ocurrir es que alguna de las tácticas se acomode mejor por sus características a las necesidades, exigencias y circunstancias propias de una empresa. Solo el conjunto de los tres primeros niveles se puede medir en el campo estratégico[266] del mantenimiento, bajo el enfoque sistémico kantiano. Es importante acotar que la mayoría de las tácticas enunciadas y existentes usan el CMD.

6.5 Nivel Estratégico - Costos e Índices

El nivel cuatro de mantenimiento es el que permite medir el grado de éxito alcanzado de todo lo que se realiza en los tres niveles previos bajo el enfoque sistémico kantiano, mediante índices de aceptación mundial y con el uso de metodologías de validez universal que permiten valorar la gestión y operación integral de mantenimiento en una empresa.

6.5.1 Índices internacionales

La mayoría de las casas mundiales que tratan el mantenimiento como SAE, OREDA, EIREDA, ESReDa, ALADON, Military Standard, AFNOR, British Standard, etc., aceptan tres indicadores básicos: confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en las versiones presentadas en capítulos anteriores, como las medidas más estandarizadas que permiten evaluar el grado de gestión y operación por parte de los elementos estructurales de mantenimiento, así:

- Confiabilidad: valora las acciones que ejecuta producción sobre el manejo y operación de los equipos,

[266] *Nivel cuatro de mantenimiento.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

desde la óptica de fabricación y explotación de los mismos, las medidas fundamentales en que se apoya son las cantidades y los tiempos de fallas inherentes a los equipos.

- Mantenibilidad: mide las actividades de reparaciones y tareas proactivas que realizan el área de mantenimiento sobre los equipos, sus medidas básicas son el volumen de reparaciones (o tareas planeadas) y los tiempos efectivos de realización y sus demoras, en el caso de la mantenibilidad la evaluación se asocia a los grupos de personas que hacen los mantenimientos o las reparaciones.

- Disponibilidad: es una relación que muestra la proporción de tiempo útil efectivo frente al tiempo total disponible, la relación está gobernada por parámetros y metodologías de cálculo presentadas en capítulos anteriores de orden mundial.

La utilización de los parámetros directos y asociados al CMD permite la comparación contra equipos similares o afines a nivel mundial o también establece una relación de comportamiento en el tiempo consigo mismo, es decir permite la valoración de la misma máquina en el tiempo para conocer su evolución. De la interpretación, uso y análisis de las curvas características CMD, de sus pronósticos y de todos los cálculos asociados se desprenden las estrategias a realizar para lograr alcanzar las metas, objetivos, misión y visión de las empresas a través del uso intensivo de estos instrumentos en la gestión y operación de mantenimiento.

Indudablemente, los valores CMD son de índole operativo y de mantenimiento como de gestión integral de una fábrica, ellos en sí mismos no tienen en cuenta los aspectos económicos y monetarios, es indispensable relacionar los valores calculados CMD con la inversión en dinero realizada para alcanzarlos, para ello se utiliza a nivel universal el concepto de *LCC* y de costos de mantenimiento.

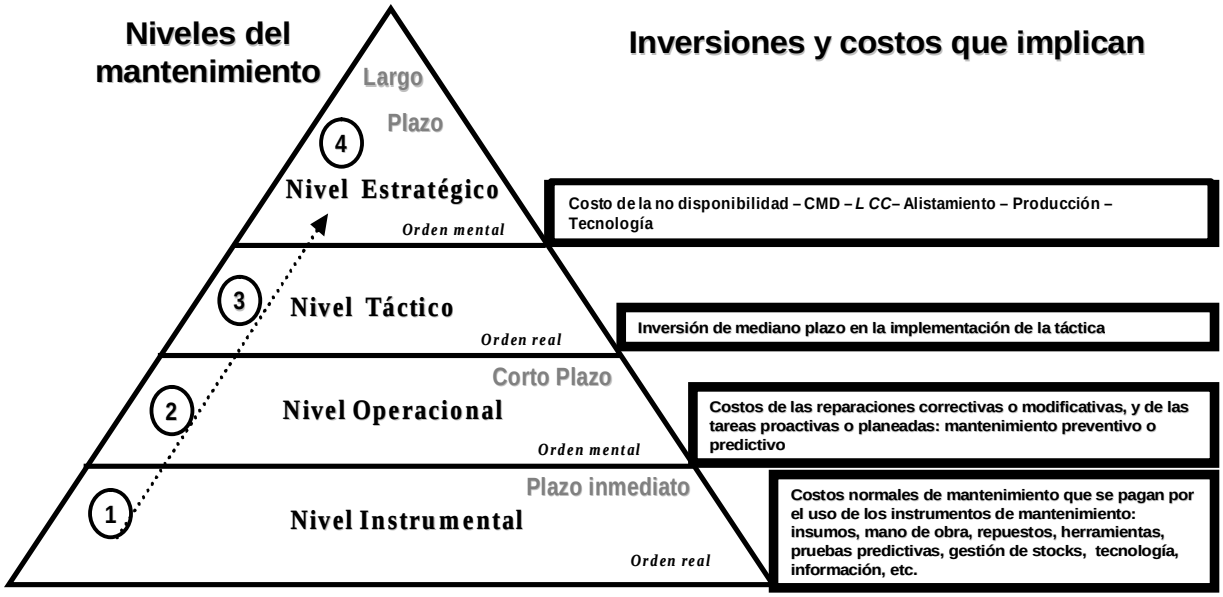
EL *Life Cycle Cost* permite valorar la situación económica de la máquina y su viabilidad técnica y financiera al través de su ciclo de vida, es allí donde se puede tener un criterio claro de la efectividad lograda con todo lo realizado en los cuatro niveles de mantenimiento.

Algunos valores CMD, parámetros asociados, modos de falla, fallas funcionales e ítems mantenibles de equipos muy comunes se pueden observar en la Norma ISO 14224 (Trofeé@, 2006) y en los libros de la Casa OREDA y ESReDa (OREDA, 2002) (OREDA, 1997).

6.5.2 Costos

Los indicadores asociados a cada uno de los cuatro niveles de mantenimiento se pueden asociar, mediante la siguiente descripción:

Ilustración 171 - Costos asociados a los niveles kantianos de mantenimiento



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Estos costos, se pueden clasificar en (Navarro, y otros, 1997):

6.5.2.1 Costos fijos

Son los que se refieren a todas las acciones planeadas de mantenimiento, implican los valores que se pagan por usar todos los instrumentos (básicos, avanzados genéricos y específicos como los específicos de orden técnico) que se requieren para llevar a cabo las tareas proactivas.

Son fijos porque son independientes del volumen de producción o servicios que se haga, como también porque son planeados para períodos lectivos de tiempo definidos previamente.

Se controlan mediante una buena planeación de las tareas proactivas basadas netamente en los pronósticos CMD de los equipos, por medio de los cuales se pueden establecer la cantidad y la frecuencia de las intervenciones planeadas mínimas de tal forma que se conserven la confiabilidad y sobre todo el valor del βeta en los niveles deseados.

6.5.2.2 Costos variables

Son los gastos en que se incurre cuando aparecen fallas o reparaciones no planeadas. Todas las acciones correctivas o modificativas no planeadas generan este tipo de costos, igual que el anterior sus valores dependen de la mano de obra, repuestos, materiales, instrumentos de mantenimiento, etc. que se usen para llevar a cabo las reparaciones o modificaciones a los equipos.

Estos costos se pueden controlar mediante la aplicación de instrumentos como el análisis de fallas, el procedimiento *FMECA*, el *RPN*, análisis predictivos y demás instrumentos disponibles que eviten a toda costa las fallas; con el apoyo de los pronósticos CMD que de alguna manera ilustran los tiempos probables futuros en que se han de presentar fallas en los sistemas, equipos o elementos de producción.

6.5.2.3 Costos financieros.

La inversión que se tenga en repuestos, insumos y/o materias primas de mantenimiento en almacenes, la duplicidad de maquinaria para elevar la confiabilidad (o disponibilidad) y demás valores asociados generan los costos financieros.

Uno de los rubros más importantes es el *LCC* que no es sino la manifestación del costo del CMD que se desea tener en esa empresa. Deben tenerse en cuenta en este rubro los costos de oportunidad de no tener disponibles algunas referencias *Push* requeridas en un momento dado.

6.5.2.4 Costos de la no disponibilidad por fallas

El valor que implica no poder utilizar una máquina debido a reparaciones o modificaciones, causados por fallas imprevistas es el rubro más importante en los costos de mantenimiento, normalmente es superior a los otros tres anteriores sumados y es el que probablemente menos atención se le presta en las empresas, pero es indudablemente el más relevante de todos.

La estimación del costo de no disponibilidad se realiza mediante:

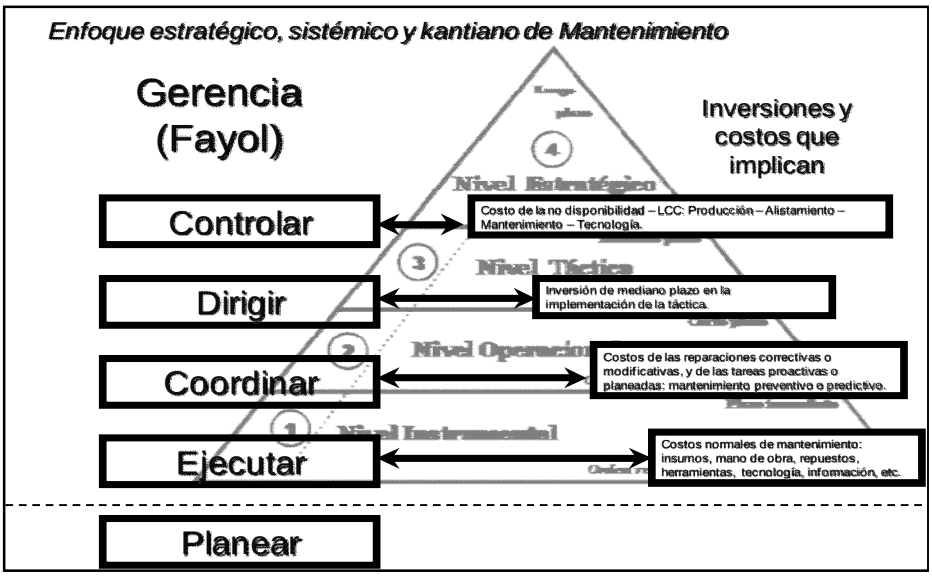
Ecuación 76 - Estimación del costo por fallas

$$\text{Costo de la no disponibilidad} = \text{Costo de la producción en tiempo} * (1 - \text{Disponibilidad en tiempo})$$

La suma de los cuatro rubros permite un control estratégico permanente sobre la gestión y operación del mantenimiento, ya que desglosa básicamente todas las actividades y niveles del mantenimiento (Mora, 2007b) (Navarro, y otros, 1997).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ilustración 172 - Control integral de Fayol y su asociación con costos



El control integral se alcanza al desarrollar un sistema de costeo, al asociarlo con los niveles de gestión[267] y operación de mantenimiento a partir de los principios de dirección de Fayol, mediante el cual se pueden establecer las cinco funciones básicas en las categorías kantianas de mantenimiento.

6.5.3 Indicadores

Las diferentes empresas y asociaciones de mantenimiento, establecen diversos indicadores de gestión u operación mediante los cuales hacen un control muy particular de su manejo empresarial, por lo cual es muy lógico encontrar múltiples indicadores que persiguen fines muy particulares de las instituciones que los construyen, la recomendación es la misma, trabajar con indicadores de corte internacional y de validez mundial como son el *LCC* y el CMD, más sin embargo en ocasiones resulta interesante medir algunos de estos índices en forma particular en las empresas que así lo requieren (González, 2004).

De los autores Navarro, Pastor y Mugaburu, se pueden mostrar algunos indicadores:

6.5.3.1 Indicadores para la alta dirección. Estratégicos

1 - Indicadores sobre procesos y actividades:

- Número de intervenciones y duración de las mismas
- Total horas trabajadas y el total de trabajos realizados
- Número de trabajos pendientes con su valoración en horas
- Número de mantenimientos modificativos o de mejoras, sus tiempos, inversión y retornos

2 – Indicadores de resultados:

- Objetivos parciales o totales logrados
- Disponibilidad media de cada máquina o línea de producción
- *MTTR*, *MTBF*, tiempos medios de respuesta a las averías, horas totales de paro para y por mantenimiento

3 – Indicadores de instrumentos de mantenimiento o factores productivos. Se refieren a la información sobre mano de obra empleada, materiales y el costo de los mismos:

[267] *Si se entiende management en ingles como gestión y operación en castellano.*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Mano de obra propia y subcontratada por órdenes de trabajo realizadas
- Costos de materiales por trabajo, movimientos y rotaciones de almacén, repuestos obsoletos e inservibles
- Presupuesto versus realidad

6.5.3.2 Indicadores de orden Operativo

Son de orden técnico-económico, sirven para los ejecutores y planeadores del mantenimiento.

1 - Indicadores sobre procesos y actividades:

- Curvas de intervenciones versus tiempo duración
- Curvas de intervenciones versus gastos
- Trabajos pendientes o atrasados
- Comparación de trabajos similares

2 – Indicadores de resultados:

- Comparan las acciones contra resultados
- *MTTR* y *MTBF* frente a tiempos y costos
- Fallas y reparaciones repetitivas

3 – Indicadores de Factores productivos.

- Carga de trabajo, órdenes de trabajo en proceso, terminadas y correcciones por trabajador y área
- Disponibilidad y confiabilidad de cada equipo comparada en el tiempo.
- Consumos y gastos de cada trabajo
- Materiales comprados y usados frente número de horas de operación y paro

Se debe tener especial cuidado en no incorporar demasiados indicadores, que con el tiempo se pueden llegar a convertir en motivo de esclavitud para el analista de mantenimiento, y que probablemente no le presten ningún beneficio; se deben tener pocos que sean verdaderamente útiles y revisarlos cada cierto tiempo en cuanto a utilidad y beneficio.

6.5.4 Terotecnología – LCC

Es la ciencia integradora de todos los aspectos del enfoque kantiano de mantenimiento, a través de ella se logran integrar todos los niveles del mantenimiento junto con sus elementos estructurales y sus relaciones gobernadas por las leyes del CMD. Es en la Terotecnología donde se apoya el concepto del costo económico integral del ciclo de vida *LCC* y a partir de allí donde se establecen los indicadores magnos de mantenimiento: efectividad, *LCC* y CMD (Evans, 1975).

La Terotecnología consiste en (Evans, 1975) (Wakefield, 1985):

- Obtener información acerca de los activos físicos y su desempeño, esto debe incluir hechos y tendencias sobre la productividad, costos, disponibilidad, causas de fallas, funcionamiento, frecuencia y severidad de los tipos de falla, piezas de repuesto usadas, frecuencia de trabajo de los niveles de mantenimiento, entre otros.

- Analizar la información para determinar la causa de los problemas; estos pueden ser por diferentes causas de falla, debido a malos estándares de mantenimientos, diseños de mala calidad, operaciones inadecuadas, falta de lubricación, repuestos de mala calidad, sobrecarga de los equipos, materiales incorrectos durante el proceso, entre otros.

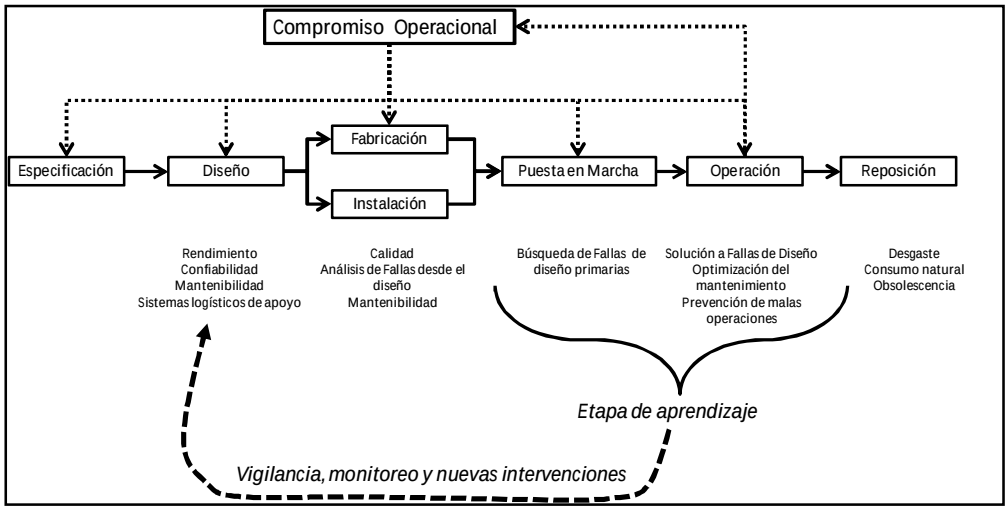
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- Adoptar acciones apropiadas para eliminar o reducir las causas de los problemas en los procesos.

6.5.4.1 Costo de ciclo de vida (LCC)

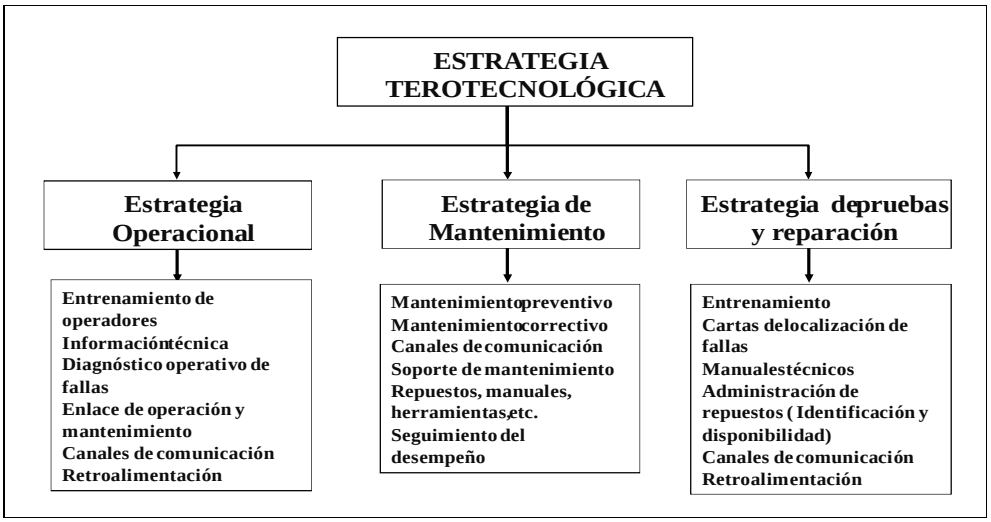
El concepto de costo de ciclo de vida es enfocado en las normas del gobierno Británico como Terotecnología, donde se define en la norma Británica BS3811 como una combinación de dirección, finanzas, ingeniería, construcción y otras prácticas aplicadas a perseguir el costo de vida económico de los activos físicos (Barringer@, 2005).

Ilustración 173 - Etapas de la Terotecnología



Su estrategia de aplicación se desenvuelve en tres campos:

Ilustración 174 - Estrategias de aplicación de la Terotecnología



La fórmula magna de estimación estratégica de mantenimiento, se establece así:

Ecuación 77 - Efectividad y LCC en mantenimiento

$$LCC = \sum_{0}^{T} \frac{1}{(1+r)^n} * C(n)$$, donde

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

r es la tasa de descuento o rata de interés
C (n) es el costo en el año n.
T es la vida útil en años

$$\text{Efectividad de la máquina o elemento} = Confiabilidad * Mantenibilidad * Disponibilidad * Capacidad\ utilizada$$

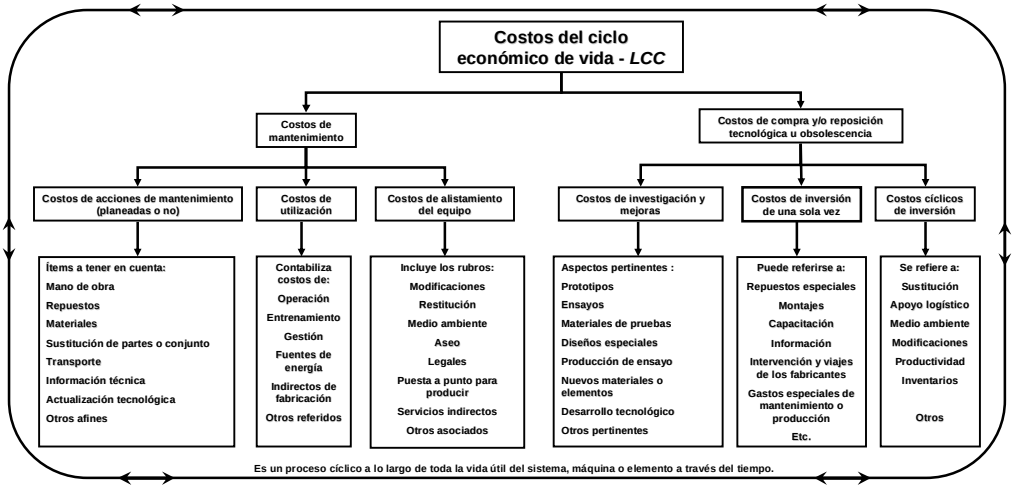
$$\text{Efectividad del sistema} = \frac{Efectividad\ de\ la\ Máquina\ o\ del\ elemento}{LCC} = \frac{C * M * D * K}{LCC}$$

$$donde\ LCC = Life\ Cycle\ Cost\ y\ K = Cpacidad\ utilizada$$

(Barringer@, 2005)

El ciclo económico de vida *LCC* contempla el cálculo integral a través de toda la curva característica de vida o de tasa de fallas.

Ilustración 175 - LCC



Para el cálculo real de LCC se puede apoyar en el programa informático dispuesto en Excel en el CD adjunto bajo la descripción de Programa de CD 27 – *LCC*.

Programa de CD 27 - LCC

6.5.5 Gestión de Activos

Las empresas día a día se enfrentan a la difícil situación de tener que incorporar, administrar y mantener una mayor cantidad de activos fijos para poder atender los mismos mercados con los mismos servicios y productos, esto genera entonces la necesidad de desarrollar una metodología de gestión de activos basada en costos e indicadores CMD que garanticen que estos generen cada vez más ingresos y menos gastos.

Es el *LCC* y la metodología de gestión de activos la única forma de enfrentar estos hechos que conducen cada vez más a la necesidad de desarrollar metodologías científicas, prácticas y útiles que permitan controlar los costos durante su ciclo integral de vida, con apoyo de los indicadores estratégicos de *LCC*, CMD y costos integrales.

El impacto de la implementación de la tecnología de gestión de activos en las empresas se refleja en sus cuatro objetivos principales: reducción de costos en la gestión y operación del mantenimiento, aumento de la disponibilidad de los equipos y líneas de producción, incremento de la vida útil de los activos y disminución de los niveles de inventarios de repuestos e insumos(Mora, 2007b) (Mora, 2007c).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

6.6 Resumen del Capítulo 6 – Niveles Estratégico, Táctico y Operacional

La última sección describe, profundiza y enuncia todos los componentes y elementos principales, de cada uno de los tres últimos niveles estructurales de mantenimiento, iniciando en el nivel dos de las diferentes operaciones, continua con el nivel tres describiendo cada una de las tácticas más utilizadas a nivel mundial y concluye en el nivel cuatro de orden estratégico, permitiéndole al lector hacer una integración total de todas las áreas sistémicas de mantenimiento (con el nivel uno ya descrito anteriormente), con el fin de que pueda elaborar una estrategia con sus respectivas actividades para poder realizar una gestión y operación efectivas del mantenimiento, utilizando las mejores prácticas internacionales y adaptándolas a las propias.

6.7 Preguntas, Desarrollos, Foros y Ejercicios del Capítulo 6

- Describa cada una de las cuatro operaciones básicas de tareas de mantenimiento, enfatizando en sus diferencias, ventajas, aplicaciones opcionales y limitaciones, con el fin de que cualquier empresa pueda diferenciarlas y utilizarlas adecuadamente.

- Bosqueje un cuadro sinóptico con todas las tácticas descritas en el capítulo, demostrando su funcionalidad, reglas, normas, pilares, aplicaciones posibles, etapas y condiciones de implementación, bondades y desventajas.

- Refiera las condiciones y situaciones necesarias de mantenimiento y operación, requeridas para llevar a cabo la implementación de cada una de las tácticas revisadas.

- Defina en que consiste el *LCC* y cuál es la ventaja de su aplicación para alcanzar el éxito en mantenimiento.

- Enuncie y explique por favor los diferentes costos existentes en mantenimiento. Coloque ejemplos en cada caso.

- Realice un caso real de una empresa de su localidad, genere un diagnóstico completo, integral y detallado de la situación actual en cuanto a operaciones, táctica y estrategias de mantenimiento que use actualmente. A partir de las condiciones de la empresa recomiende una táctica y las acciones estratégicas que debe realizar, con el fin de garantizar la máxima efectividad del mantenimiento.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

7 Bibliografía

Ahlmann H. LCC/LCP Theory and Case Studies - Department of Industrial Managment [Publicación periódica] = Beneficios del ciclo de vida útil. Un nuevo concepto de mantenimiento // Mantenimiento España / ed. Mantenimiento Asociación Española de. - Madrid : [s.n.], Marzo a Abril de 1987. - 020. - ISSN 0214-4344.

AMEF@ Análisis de Fallas [En línea] = AMEF // GestioPolis. - 2005. - Libre. - 2008. - http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/ger/amef.htm.

Annis@ Charles - P.E. Goodness-of-Fit tests for Statistical Distributions [En línea] = Goodness-of-Fit tests for Statistical Distributions // Statistical Engineering. - Enero de 2008. - 07 de Diciembre de 2008. - http://www.statisticalengineering.com/goodness.htm. - Email autor Charles.Annis@StatisticalEngineering.com.

Árbones Eduardo A. - Malinasi Logistica Empresarial [Libro]. - Barcelona : Alfaomecga Marcombo - Boxierau Editores, 1999. - pág. 5 a 24. - 970-682127-7.

Automóvil@ Wikipedia [En línea] = Historia del Automóvil // Historia del Automóvil. - 2008. - 15 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_autom%C3%B3vil.

Aven T Avialability Formula for Stand by Systems of Similar Units That Are Prevently Maintained En: IEEE Transaction and Reliability [Libro]. - [s.l.] : Transactions and Reliability, 1999. - Vol. 39 : 5.

Ávila Rubén - Espinosa Fundamentos del mantenimiento - Guías Económicas, Técnicas y Administrativas [Libro]. - Cd. de México : Limusa Grupo Noriega Editores pRIMERA REIMPRESIÓN, 1992. - Primera reimpresión. - ISBN 968-18-2528-4.

Babylon@ Dictionary of Information at your fingertips [En línea] // Baylon - Diccionario, se debe instalr en el ordenador que se use. - 2008. - 16 de Noviembre de 2008. - http://www.babylon.com. - http://www.babylon.com/affiliates/landing/download.php?id=CD5253&camp=275&lang=spa.

Bajaria H. J. Integration of Reliability, Maintainability and Quality Parameters in Design of Heavy Duty Vehicles (L. Ray Buckendale lecture) - Society of Automotives Engineers, Inc. [Libro]. - Palo Alto : Warrendale, 1983. - ISBN: 0898833043.

Ballou Ronald H. Administración de la cadena de suministro - Traducido por Carlos Mendoza Barraza y María Jesús Herrero Díaz [Libro]. - México DF : Editorial Pearson Educación, 2004. - págs. 1-32. - ISBN: 970-26-0540-7.

Barajas Oscar Mauricio - Pinzón Breve Historia de la Ingeniería - Partes 1, 2 y 3 [Publicación periódica] = Breve Historia de la Ingeniería Mecánica - Parte 1 - Parte 2 - Parte 3 // Ingenierías. - Nuevo León : [s.n.], Abril - Junio del No. 19, de Julio a Septiembre del No. 20 y de Octubre a Diciembre de 2003 del No. 21 de 2003. - 19, 20 y 21 : Vol. VI. - págs. 47-53 del número 19, 62-74 del número 20, 56-63 del número 21. - Web ingenierias.uanl.mx/19/pdf/brevehistoriadelaing.PDF. - ISSN 1405-0676.

Barlow Richard E Engineering Reliability [Libro] = Engineering Reliability. - [s.l.] : Editorial Board SIAM, 1998. - pág. 199. - ISBN: 0898714052..

Barlow Richard E y Proschan Frank Mathematical Theory of Reliability [Libro]. - New York : John Wiley & Sons, Inc, 1996. - ISBN 0898713692.

Barringer@ H. Paul. Availability, Reliability, Maintainability, and Capability [En línea] = Life Cycle Cost Issues // Availability, Reliability, Maintainability, and Capability / ed. H. Paul Barringer P.E. / prod. Barringer & Associates Inc.- Humble - Texas - USA. - 2005. - 11 de Noviembre de 2008. - http://www.barringer1.com/lcc.htm.

Bautista E. - Paz [y otros] Evolución y desarrollo de la ingeniería mecánica a través de las grandes áreas culturales [Conferencia] = Evolución y desarrollo de la ingeniería mecánica a través de las grandes áreas culturales // Octavo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. - Cusco - Perú : [s.n.], 2007. - Bautista - Trabaja en la División de Ingeniería de Máquinas de la Universidad Politécnica de Madrid de España, su email es ebautista@etsii.upm.es.

Bazovsky Igor Reliability Theory and Practice [Libro] = Reliability Theory and Practice. - [s.l.] : Edit. Dover Publications Incorporated, 2004. - pág. 304 . - ISBN: 0486438678..

Beck@ Richard Asset Management [En línea] = Acieve Best-in-Class Reliability // Meridium Inc.. - Original de la revista Chemical Engineering Progress - USA, Junio de 2003. - 18 de Diciembre de 2008. - http://www.meridium.com/news_events/articles/pdf_files/achieve_best_in_class_reliability.pdf. - www.cepmagazine.com.

Benítez Luis Eduardo - Hernández Lectura de revisión de este libro Mantenimiento Industrial Efectivo = Revisión técnica avanzada de esta obra de mantenimiento y aportes técnicos profundos. - Bogotá : Universidad nacional de Colombia, 23 de Diciembre de 2008. - El Dr. Luis Eduardo Benítez H., es en la actualidad el decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica. - Email lbenitezh@unal.edu.co.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Benítez Luis Eduardo - Hernández Opiniones y conceptos especiales sobre mantenimiento avanzado [Entrevista] = Mantenimiento industrial y sus conceptos / trad. Castellano Idioma. - Lima : Personal - IPEMAN ; Entrevista en Congreso de Mantenimiento en Lima Perú - IPEMAN ; IPEMAN, 20 de Julio de 2007. - Email lbenitezh@unal.edu.co.

Bertalanffy Ludwing von Teoría General de los Sistemas [Libro] = Teoría General de los Sistemas. - Bogotá : Fondo de Cultura Económica Limitada, 1994. - pág. 311. - ISBN: 958-38-0011-2.

Bertalanffy1 Ludwing von Teoría General de los Sistemas - Fondo de Cultura Económica Ltda [Libro] = Teoría General de los Sistemas. - Bogotá : Fondo de Cultura Económica, 1994. - pág. 311. - ISBN: 950-557-096-1.

Bertancourt Agustín - y Molina y de Lanz José María Ensayo sobre la composición de Máquinas [Libro] / ed. Colección de Ciencias Humanidades e Ingeniería. - París : Colegio de Ingenieros, Canales y Puertos, 1802. - http://www.museoelder.org/betancourt/indexbiografia.html.

Bierman Harold, Bonini Charles P y Hausman Warren H Análisis cuantitativo para la toma de decisiones: Modelos deterministas y probabilísticas [Libro]. - Madrid : Editorial Irwin, 1991. - Octava edición. - ISBN 84-8086-273-4..

Blanchard Benjamín S, Verma Dinesh y Peterson Elmer Series Nuevas dimensiones en Ingeniería - Maintenibility: a key to effective serviceability and maintenance management [Libro] = Maintenibility. - [s.l.] : Edit. Wiley Interscience - Wiley, John & Sons, Incorporated, 1994. - pág. 560. - ISBN: 0486438678.

Blanchard Benjamín S. Ingeniería Logística – Traducido de Logistics Engineering and Maintenance – ISDEFE [Libro] = Ingeniería Logística. - Madrid : ISDEFE© - Monografías.com, 1995. - pág. 153. - ISBN: 84-89338-06X.

Bleazard Dirk, Hepler Don y Dearman Larry Equipment reliability improved at Barrick Goldstrike [Libro]. - [s.l.] : Review Mining Enginering, 1998. - Vol. 50. - ISSN 0026-5187.

Blitz@ Dictionary of Information at your fingertips [En línea] = RCM Scorecard // RCM Scorecard. - 2005. - Diciembre de 2008. - http://www.mt-online.com/articles/1004internet.cfm - http://www.babylon.com.

Bohan William F El poder oculto de la productividad [Libro] = El poder oculto de la productividad. - Bogotá : Grupo Editorial Norma - Impreso por Imprelibros S.A, 2003. - pág. 240. - ISBN 958-04-7120-7.

Boxwell Robert J. Benchmarking for competitive advantage [Libro] / ed. Hill McGraw / trad. ventaja Al castellano como Benchmarking para competir con. - Madrid : McGraw Hill Companies, Ind, 1994. - pág. 225. - ISBN: 0070068992 en inglés y en castellano ISBN: 84-481-1837-5.

Brewster J. D Simplifying the Myths About Contract Maintenance. - A.I.P.E. Facilities Review [Libro] = Simplifying the Myths About Contract Maintenance. - [s.l.] : Mcgraw HIll, 1997. - Primera : págs. 43 - 48 (662). - ISBN-10: 0070521697, ISBN-13: 978-0070521698 .

Chiavenato Idalberto Introducción A La Teoría General De La Administración [Libro] = Introducción A La Teoría General De La Administración . - Madrid : McGraw Hill, 2005. - Séptima : pág. 584. - Compra disponible en web http://www.buscalibros.cl/libro.php?libro=185295. - ISBN 9701055004.

China@ Kao Gong Ji Kaleidoscope [En línea] = Kao Gong Ji - China - Libro de las diversas artes // Cultura China Avances y desarrollos. - 2008. - 29 de September de 2008. - http://www.cultural-china.com/chinaWH/html/en/10Kaleidoscope674.html. - Años del 770 al 221 antes de JesuCristo.

ChinaABC@ CRI ON LINE [En línea] = Dinastía Song de la China // Cina ABC. - 2008. - 30 de September de 2008. - http://espanol.cri.cn/chinaabc/chapter14/chapter140108.htm.

Chute@ John R. Reliability Web.com [En línea] = Efectividad en el mantenimiento // Solution Oriente Asset Reliability / prod. Conference 18th International Maintenance. - Agosto de 2003. - 19 de Diciembre de 2008. - http://www.reliabilityweb.com/art04/right_things.htm. - www.maintenanceconference.com o en http://www.reliabilityweb.com/art04/chute.pdf.

Clement Norris C, Pool John C y Carrillo Mario M Economía enfoque: América Latina [Libro]. - Bogotá : Editorial McGraw Hill, 1984. - Segunda Edición : págs. 335-338. - ISBN: 968-451-093-4.

CPFR@ Wikipedia [En línea] = CPFR - Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment // CPFR - Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment. - 2008. - Libre. - 21 de Octubre de 2008. - http://en.wikipedia.org/wiki/CPFR.

CUIO-88-OIT, Darnell H y Smith M. Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones - Descrita por la OIT Oficina Internacional del Trabajo - Management aspects of Terotechnology - Conference of British Steel [Libro]. - Suiza, London : [s.n.], 1991. - ISBN: 92-2-306438-4.

Darnell H y Smith M. Management aspects of Terotechnology – Conference de la British Steel Corporation [Conferencia] = Management aspects of Terotechnology / ed. Corporation British Steel. - London - England : [s.n.], 1975. - Vol. Númerto 185.

De Bono Edward Seis sombreros para pensar [Libro] = Seis sombreros para pensar. - Buenos Aires : Ediciones Granica S.A., 2003. - pág. 173. - ISBN: 950-641-061-5.

De Groote Patrick D.G.S. Maintenance Internacional - Presidente de la Asociación Belga de Mantenimiento – Trends in Maintenance Management in Europe - Artículo Ponencia - Simposio Internacional de Ingeniería de

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Fábricas [Conferencia] // Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mantenimiento. - Medellín - Colombia : Universidad EAFIT - Medellín Colombia, 1994. - Email patrick.degroote@be.vitalo.net Cell: +32(0)495 77.77.76 Phone: +32(0)51 48.00.11.

de Honnecourt Villard Cuaderno - Máquinas [Libro] / ed. Cantos Tres. - Madrid : AKAL S.A., 2001. - Citado por Bautista. - ISBN 9788446017769 .

De Miguel Fernández Enrique – – Servicio de Publicaciones d ntroducción a la Gestión "Management" - Volumen I y II Departamento de Organización de Empresas, Economía Financiera y Contabilidad – E.T.S.I. Industriales [Libro] / ed. Valencia Universidad Politécnica de. - Valencia : Servicio de Publicaciones de la UPV, 1990. - Vol. I y II : 2 : pág. 897. - Volumen I y II Departamento de Organización de Empresas, Economía Financiera y Contabilidad – E.T.S.I. Industriales. - ISBN: 84-7721-127-2.

Diagnetics@ What is Proactive Maintenance? [En línea]. - 1998.. - http://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrary/OilAnalysis/oa-what.htm.

Díaz Matalobos - Ángel Confiabilidad en mantenimiento [Libro] = Confiabilidad en mantenimiento. - Caracas : Ediciones IESA, C.A., 1992. - pág. 110. - ISBN: 980-271-068-2.

Diesel@ Portal Mecánico [En línea] = Motor y ciclo de Diesel por inyección // Motor Diesel. - 2008. - 15 de Octubre de 2008. - http://usuarios.lycos.es/jumping1/photoalbum.html.

Dounce Enrique - Villanueva La Productividad en el Mantenimiento Industrial [Libro]. - Cd. de México : Compañía Editorial Continental, SA de CV., 1998. - Segunda : pág. 350. - ISBN 968-26-1089-3.

Duffuaa S.O y Ben-Daya S Maintenance and quality: the mission link – Journal of Quality in Maintenance Engineering [Libro]. - West Yorkshire : [s.n.], 1995. - Vol. Volumen 1 : Número 1 : págs. 17 -18. - ISSN: 1355-2511.

Ebeling Charles E An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering [Libro] = An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering / ed. Waveland Press Inc.. - New York City : McGraw-Hill Science - Engineering - Math, 2005. - pág. 576. - ISBN: 1577663861.

EinsteinNASA@ Ciencia de la NASA [En línea] = NASA // NASA. - 2008. - 18 de Octubre de 2008. - http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2006/22mar_telomeres.htm.

Ellis@ Herman Principles of the Transformation of the Maintenance Function to World-Class Standards of Performance [En línea]. - 1999. - http://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrary/ezine/principles.htm.

ESReDa ESReDa Handook on Maintenance management [Libro] = Handook on Maintenance management / ed. ESReDa - European Safety Reliability & Data. - Hevik - Norway : DET NORSKE VERITAS - ESReDa, 2001. - Primera de 2001 : Vol. Uno : Statistical Series No. 5 : pág. 255. - Idioma Español. - ISBN: 82-515-02705.

ESReDa-Industrial Industrial Application of Strutural Realibility Theory [Libro] = Industrial Application of Strutural Realibility Theory / ed. DNV P. Thoft-Christensen - Det Norske Veritas. - Hovik : ESReDa Working Group Report, 1998. - ESReDa - European Safety, reliability and Data : Vol. ESReDa Safety Series No. 2 : pág. 283. - ISBN: 82-515-0233-0.

Evans D. W Terotechnology - How can it work [Libro]. - 1975.

Fayol Henry y Taylor Frederick Administración Industrial y General [Libro] = Administración Industrial y General / ed. Ateneo Librería El. - Buenos Aires : Librería El Ateneo, 1996. - Texto original de 1916 de fayol. - ISBN 9500-2354-04.

Fitch@ Jim Proactive Maintenance's Unruly Cousin - Machinery Lubrication Magazine [En línea]. - 2002. - http://www.machinerylubrication.com/article_detail.asp?articleid=335&relatedbookgroup=ContaminationControl .

Forcadas Jorge - Feliu Estadística aplicada a los Sistemas & Confiabilidad en los Sistemas [Publicación periódica] = Estadística en los sistemas de confiabilidad. - Medellín : Revista SAI - Revista SAI Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos – En: Revista SAI. No.4 Vol.1 – Medellín – Colombia - 1983, 1983. - 4 : Vol. 1. - pág. 41.

Ford Motor Company Reliability methods: designs verification and and production validation. Module IX = Reliability methods // North American Automotive Operations / ed. Ford. - Dearborn : Ford Motor Company, 1972. - Citado por Stamatis.

Gagné@ Robert y Bloom Benjamín Taxonomía de los Objetivos educacionales y formativos de los seres humanos [En línea] = Escalas de niveles de objetivos // Modelos de procesamiento de la información de los humanos.. - 21 de Septiembre de 2008. - 21 de Septiembre de 2008. - http://www.scribd.com/doc/408060/Robert-Gagne. - Se conoce como la escala de niveles de objetivos de Bloom, Barret y Gagné.

Gamma-Exp@ Gángara Rita Luna Distribución Exponencial - Asignatura Probabilidad y Estadística [En línea] = Distribución Exponencial . - Instituto Tecnológico de Chihuahua, 2005. - 6 de Diciembre de 2008. - http://www.itch.edu.mx/academic/industrial/sabaticorita/_private/03Distribucion%20Exponencial.htm. - Autora Rita Luna Gángara.

GammArgen@ Distribución Gamma [En línea] = Distribución Gamma // Departamento de Matemáticas - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. - Universidad de Buenos Aires - Argentina, 2005. - Libre. - 08 de

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Diciembre de 2008. - http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2005/1/TRANSP4C.pdf.
García Nicolás - Tapia Ventiún libros de los Ingenios - Pedro Juan de Lastanosa - Autor aragonés, de ... [Libro] / ed. D.L. Instituto de Estudios AltoAAragoneses. - Aragón : Huesca, 1990. - pág. 142. - ISBN 84-86856-39-6.
Geraghty Tony RCM and TPM complementary rather than conflicting techniques [Publicación periódica] // Journal. - USA : [s.n.], Junio de 1996. - Vol. 63. - ISSN 0141-8602.
Gnedenko Boris - Vladimirovich y Ushakov Igor A. (Translator) Statistical Reliability Engineering [Libro] = Statistical Reliability Engineering. - New Cork : Editorial John Wiley & Sons, Inc., 1999. - pág. 499. - ISBN: 0471123560..
González Francisco Javier - Fernández Auditoría del manetenimiento e indicadores de gestión [Libro] = Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión / ed. ARTEGRAF S.A.. - Madrid : Fundación CONFEMETAL, 2004. - Primera : pág. 260. - ISBN: 84-96169-36-7.
Grijalbo Mondadori Gran Diccionario Enciclopédico Ilustrado [Libro] = Gran Diccionario Enciclopédico Ilustrado / ed. Grijalbo. - Barcelona : Editorial Grijalbo Mondadori, 2000. - Vol. 1 : pág. 1822. - ISBN 84-253-3157-9.
Grossman Stanley Álgebra lineal [Libro] = Álgebra lineal. - México, D.F. : Editorial McGraw Hill, 1999. - Quinta Edición. - ISBN 0673985547 ISBN-13 978-9701008904 .
Gude@ Dietmar - Poweleit, Dettlev - Psaralidis, Elena CiteSeer X Beta - Condition-based Preventive Maintenance [En línea] = Preventive maintenance strategies of semi-autonomous work groups in flexible manufacturing // Preventive maintenance strategies of semi-autonomous work groups in flexible manufacturing - Abstract. - CiteSeer X Beta, 1998. - Libre. - 18 de Diciembre de 2008. - http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.29.1104. - http://www.ergonetz.de/maintenance/downloads/gpp98.pdf.
Hair Joseph F, Anderson Ralph y Tatham Ronald Multivariate data analysis [Libro] = Multivariate data analysis. - New York : Editorial Prentice-Hall, 2005. - pág. 928. - ISBN 0130329290, ISBN-13 978-0130329295 .
HajShirmohammad Ali y Wedley William C. Maintenance management – an AHP application for centralization/decentralization [Publicación periódica] // Journal of Quality in Maintenance Engineering. - Bradford - England : Emerald Group Publishing Limited, 2004. - ISSN 1355-2511 : Vol. 10. - pág. 16 a 25.
Halpern Siegmund The Assurance Sciences: An Introduction to Quality Control and Reliability [Libro] = The Assurance Sciences. - New Jersey City : Editorial Prentice Hall, Inc Professional Technical, 1978. - ISBN: 0130496014.
Harris Gray W Living with Murphy's law - Research-Technology Management [Libro] = Living with Murphy's law. - USA : [s.n.], 1994. - Vols. Vol.37,Iss.1 : págs. 10-13.
Hecht Myron y Jady Handal An Analytical Model for Predicting The Impact of Maintenance Resource Allocation on National Airspace System Availability [Libro]. - Beverly Hills : [s.n.], 2001. - págs. 46 - 52.
Hiatt Bruce A 13 Step Program in Establishing a World Class Maintenance Organization - [En línea] // Best Practices Maintenance USA. - 2000. - 20 de Octubre de 2008. - http://www.tpmonline.com/articles/management/13steps.htm. - Email: bhiatt@anesta.com, bhiatt4419@aol.com.
Hjorth@ U. Hjorth Distribution [En línea] = Distribución Hjorth // Hjorth Distribution. - 2005. - Libre. - 1 de 12 de 2008. - http://rss.acs.unt.edu/Rdoc/library/rmutil/html/Hjorth.html. - Librios de Hjorth: Hjorth, U. (1970). An iterative linear prediction method. ZAMM 50, 445--454. - Hjorth, U. (1980). A reliability distribution with increasing, decreasing, constant and bathtubshaped failure rates. Technometrics 22, 99--109. .
Hronec Steven M. Signos Vitales - El empleo de las medidas del rendimiento, de la calidad, el tiempo y el coste para proyectar el futuro de la empresa – Arthur Andersen - [Libro] = Signos Vitales / ed. Edigrafos S.A.. - Madrid : McGraw Hill & Interamericana de España, S.A., 1995. - pág. 300. - ISBN: 0-8144-5073-3.
Hughes@ Howard Biografía de Howard Hughes [En línea] = Howard Hughes // Biografía de Howard Hughes. - 2008. - 20 de Octubre de 2008. - http://www.spartacus.schoolnet.co.uk/JFKhughesH.htm.
Husband M - Maintenance Management and Terotechnology [Libro]. - [s.l.] : Ashgate Publishing, Limited -, 1976. - ISBN: 0566001462.
Husband Tom M. Maintenance Management and Terotechnology [Libro] / ed. House Saxon. - New York : Ashgate Publishing, Limited -, 1976. - ISBN 0566-00146-2.
IATA@ IATA - International Air Transport Association – Asociación Internacional del Transporte Aéreo [En línea] = IATA // IATA. - 2008. - 17 de Octubre de 2008. - http://www.iata.org/index.htm.
Idcon@ IDCON Inc. USA [En línea] = Mantenimiento orientado por resultados // IDCON - Rayleigh - North Caroline - USA / prod. Philosophy IDCON - Approach &. - 2000. - 20 de Diciembre de 2008. - http://www.idcon.com/article-prevopti.htm. - http://www.idcon.com/IDCON-Corp-Broch.pdf.
Idhammar Christer Maintenance management: moving from reactive to results-oriented – Journal Review Pima's Papermaker [Libro]. - 1997a. - Julio. - C. Idhammar es el Presidente de IDCON, Raleigh, NC. - ISBN:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

02018-00038 –.
Idhammar Christer Results Oriented MaintenanceTM Management Book [Informe] = Results Oriented MaintenanceTM Management Book - USA . - 1997b.
Idhammar@ Torbjorn - A New Preventive Maintenance Implementation and Training Concept - [En línea]. - 1999. - Libre. - 20 de Octubre de 2000. - http://maintenanceworld.com/Articles/reliability_jump_start.htm.
Ishikawa Kaoru Guía de control de Calidad /Upb138 [Libro] = Guía de control de Calidad. - [s.l.] : Editorial Quality Resources, 1985. - ISBN 089059046X.
Johnson L. P. Improvingt Equipment Reliability at Plant Efficiency through PM Optimisation at Kewaunee Nuclear power Plant [Publicación periódica] = PMO // SMRP 3rd Annual Conference / ed. - The Society for Maintenance & Reliability Professionals (SMRP). - Chicago - Illinois - Estados Unidos de América : [s.n.], Octubre de 1995.
Jones Richard Risk Based Management: A realibility – Centered Approach - Gulf Publishing Company [Libro]. - Houston : Gulf Professional Publishing, 1995. - pág. 282. - ISBN-10 0884157857, ISBN-13 978-0884157854 .
Kaplan Robert S. y Norton David P. El cuadro de mando integral – Edición Especial KPGM Latinoamérica – [Libro] = El cuadro de mando integral - Balanced Scorecard. - Barcelona : Ediciones Gestión 2000, S.A, 1997. - Primera Edición : pág. 322. - ISBN 84-8088-175-5.
Kapur Kailash C. y Lamberson Leonard R. Reliability in engineering design [Libro] = Reliability in engineering design / ed. Wayne State Univ. Detroit, MI (USA). Dept. of Industrial Engineering and Operations Research. - Detroit USA : John Wiley and Sons, Inc.,New York, 1977. - Primera : pág. 606. - Org Wayne State Univ., Detroit, MI (USA). Dept. of Industrial Engineering and Operations Research. - ISBN-13: 978-0-471-51191-5.
Kececioglu Dimitri Maintainability, Availability, & Operational Readiness Engineering [Libro] = Maintainability. - New Jersey City : Editorial Prentice-Hall Professional Technical, 1995. - ISBN: 0135736277.
Kelly Anthony y Harris M. J. Gestión del MantenimientoIndustrial [Libro] = Gestión del Mantenimiento Industrial / ed. Gráficas Mar-Car S.A.. - Madrid : Fundación REPSOL Publicaciones e Impreso en Gráficas del Mar – Traducido por Gerardo Álvarez Cuervo y equipo de trabajo, 1998. - pág. 218. - ISBN: 84-923506-0-1 – T.
Kiyosaki Robert T y Lechter Sharon L. Padre rico, padre pobre [Libro] = Padre Rico, Padre Pobre / ed. Gold Press Inc.. - Buenos Aires : Time & Monkey Network Editions, 2000. - pág. 220. - ISBN 987-97024-5-X ó 0-943856-1-9.
Klusman Robert A Establishing Proactive Maintenance Management – Review Journal - Water / Engineering & Management [Libro]. - USA : [s.n.], 1995. - págs. 18 - 20.
Knezevic Jezdimir Mantenibilidad [Libro] = Mantenibilidad. - Madrid : Editorial ISDEFE, 1996. - ISBN: 84-89338-08-6.
Kume Hitochi Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad [Libro] = Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad. - Bogotá : Grupo Editorial Norma, 1992. - págs. 171 - 172. - ISBN: 958-041541-2.
Ladiray Dominique y Quenneville Benoît Methodologica [Publicación periódica] = DESESTACIONALIZAR CON EL MÉTODO X-11 // REVUE DES TECHNIQUES, MÉTHODES ET INSTRUMENTS DE RECHERCHE EN SCIENCES HUMAINES / ed. BRUXELLES Laboratoire de Méthodologie du Traitement des Données - UNIVERSITÉ LIBRE DE. - Bruxelles - Belgique : REVUE DES TECHNIQUES, MÉTHODES ET INSTRUMENTS, Abril de 2000. - 200 - 2001 - Nos. 8 - 9. - pág. 236. - Traducción al castellano: Eduardo CRIVISQUI - Véase sección 2.2. - ISSN: 0778-7553.
Langan George Maintenance automation – Review I.I.E. Solutions [Libro] = Maintenance automation . - USA : [s.n.], 1995. - Vol. Volumen 27 : No. 7 : págs. 14-17..
Latino Robert Applied Industrial Training Pays-off. [En línea] = Applied Industrial Training Pays-off. // Maintenance Technology. - Junio de 1999b. - Libre. - 15 de Octubre de 2008. - http://www.reliability.com/article25.htm.
Latino@ Robert The failure dilemma [En línea] = The failure dilemma // Reliability Center, Inc.. - Agosto de 1999a. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - http://www.reliability.com/article18.htm or http://www.maintenanceresources.com/referencelibrary/failureanalysis/dilemma.htm.
Leemis Lawrence M Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods [Libro] = Reliability. - New Jersey City : Editorial Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, 1995. - ISBN: 0-13-720517-1.
Levin Richard Estadistica para Administradores [Libro] = Estadistica para Administradores . - Cd. de México : Prentice Hall , 1996. - pág. 1171. - Trata bien el teorema del límite central. - ISBN: 978-9688806753.
Lewis Elmer E. Introduction to Reliability Engineering [Libro]. - [s.l.] : Editorial John Wiley & Sons, Inc, 1995. - Segunda : pág. 435. - ISBN: 0471018333.
Lorick Harry y Varela Steve Infraestructure Maintenance System [Publicación periódica] // Review Public

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Works / ed. Works Review Public. - País Estados Unidos : [s.n.], Mayo de 1998. - pág. 46 y 47. - ISBN 9780965618380. - ISBN: B000987KYW.

Marks John Combining TPM and reliability-focused maintenance (RCM), reliability centered maintenance, electric maintenance & repair [Libro]. - USA : [s.n.], 1997. - Vol. Volumen 211 : págs. 49 - 52. - ISSN 0013-4457.

Mather Daryl The Maintenance Scorecard - Creating Strategic Advantage [Libro] = Maintenance Scorecard / ed. Carleo John. - New York : Industrial Press, Inc., 2005. - pág. 257.

Modarres Mohammed What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk Analysis [Libro] = What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk Analysis. - New York City : Editorial Marcel Dekker, 1993. - pág. 351. - ISBN: 082478958X.

Molinero@ Luis M. Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión [En línea] = Análisis de series temporales // Liga Española para la lucha contra la Hipertensión Arterial. - Alce Ingeniería, Enero de 2004. - Libre. - 12 de Diciembre de 2008. - http://www.seh-lelha.org/tseries.htm. - Email estadistica@alceingenieria.net.

Moore@ Clive Maintability,Another Maintenance Improvement Opportunity [revisado Agosto de 2001 por toro y otro] [En línea] // TPM ON LINE. - 2001. - 2001. - http://www.tpmonline.com /articles_on_total_productive_maintenance/reliability/maintainability.htm>.

Moore@ Ron - Rath, Ron Fiabilidad, Mantenibilidad y Mantenimiento Proactivo [En línea] = La combinación del TPM y el RCM. // La combinación de TPM y RCM. Estudio de un caso práctico. - Gestión de Activos - Industriales, 2008. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - www.alcion.es/Download/ArticulosPDF/gai/gratis/04articulo.pdf .

Mora Alberto - Gutiérrez ¿…Será factible medir la gestión gerencial del mantenimiento…? – Universidad EAFIT – Revista Universidad EAFIT Escuela de Administración y Finanzas y Tecnologías [Libro] = ¿…Será factible medir la gestión gerencial del mantenimiento…? / ed. EAFIT. - Medellín : Universidad EAFIT, 1990c. - Número 0079 : págs. 45 - 65. - ISSN: 0120-341X.

Mora Alberto - Gutiérrez ¿Cómo dimensionar el futuro de una empresa de servicios de mantenimiento? – ACIEM – Revista ACIEM Asociación Colombiana de Ingenieros Electricistas, Mecánicos, Electrónicos y Afines [Libro]. - Bogotá : [s.n.], 1998a. - Vol. Número 09 : págs. 40 - 43.

Mora Alberto - Gutiérrez Mantenimiento Estratégico Empresarial [Libro] = Mantenimiento Estratégico Empresarial. - Medellín : Fondo Editorial FONEFIT, 2007b. - Primera : pág. 345. - ISBN 978-958-8281-46-9.

Mora Alberto - Gutiérrez Mantenimiento Estratégico para empresas industriales o de servicios [Libro] = Mantenimiento Estratégico. - Envigado : AMG, 2007a. - Segunda : pág. 306. - ISBN 978-958-3382185.

Mora Alberto - Gutiérrez Modelo sistematizado de gerencia y administración del mantenimiento industrial - Tesis Investigación para optar al título de Magister en Administración [Libro] = Modelo sistematizado de gerencia y administración del mantenimiento indutrial. - Medellín : [s.n.], 1990. - pág. 254. - Tesis de Magister de Administración de Empresas . Universidad EAFIT Colombia.

Mora Alberto - Gutiérrez Planeación estratégica de alta dirección en empresas de mantenimiento - ACIEM [Libro]. - Bogotá : Revista ACIEM Asociación Colombiana de Ingenieros Electricistas, Mecánicos, Electrónicos y Afines, 1995. - Número 077.

Mora Alberto - Gutiérrez Pronósticos de demanda e Inventarios - Métodos Futurísticos [Publicación periódica] = Pronósticos / ed. Ediciones Ultragráficas. - Medellín : AMG, Diciembre de 2007c. - ISBN: 978-958-44-0233-2 .

Mora Alberto - Gutiérrez Selección y jerarquización de las variables importantes para la gestión de mantenimiento en empresas usuarias o generadoras de tecnologías avanzadas [Informe] = Mantenimiento industrial en empresas de tecnologías avanzadas : Tesis de doctorado - Ph.D. en Ingeniería Industrial Cum Laude / Organización de Empresas ; Universidad Politécnica de Valencia. - Valencia : [s.n.], 1999.

Mora Alberto - Gutiérrez Selección y jerarquización de las variables importantes para la gestión de mantenimiento en empresas usuarias o generadoras de tecnologías avanzadas [Libro] = Mantenimiento en empresas de alta tecnología. - Valencia : Escuela de Ingenieros Industriales U.P.V., 1999. - pág. 370.

Mora Alberto - Gutiérrez, Pérez Anastasi - Peral y Ortiz Germán - Plata Indicadores de Gestión y Operación del Mantenimiento?_ ¡No!... ¡Gestar y Operar el Mantenimiento a partir de Indicadores Futuros!– Revista de la Comisión de Integración Energética Regional Americana [Libro]. - Montevideo – Uruguay : CIER – Sin fronteras para la energía, 2003. - ISSN: 0379-850X.

Morris@ Charles E. You can bank on it - Proactive maintenance [En línea] // Food Engineering - Highlands Ranch / ed. Engineering Food. - July - August de 1999. - 2006.

Motor@ Wikipedia [En línea] = Motor de Combustión // Motor de Combustión Interna. - 2008. - 16 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_combusti%C3%B3n_interna.

Moubray John Mitchell RCM Reliability Centered Maintenance - Industrial Press Inc [Libro] / ed. Biddles Limited Guilford and Rob Lockhart / trad. Ellman Sueiro y Asociados - Argentina. - Leicestershire : Aladon Limited, 2004. - Primera en castellano : pág. 433. - ISBN 09539603-2-3.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Moubray@ John. About RCM [En línea] = RCM // Aladon inglaterra. - ALADON RCM, 2001. - Libre. - 19 de Diciembre de 2008. - http://www.aladon.co.uk/02rcm.htm.
Nachlas Joel Fiabilidad [Libro] = Fiabilidad. - Madrid : ISDEFE, 1995. - ISBN: 84-89338-07-8.
Nakajima Seiichi [y otros] Introducción al TPM Programa Para El Desarrollo [Libro] = Introducción al TPM Programa Para El Desarrollo / trad. Alvarez Traducido por Antonio Cuesta. - Madrid : Editorial Fundación REPSOL Publicaciones e Impreso en Gráficas del Mar, 1991. - ISBN: 84-87022-81-2.
Nakajima5S@ Total Productive Maintenance [En línea]. - Alexander Witt - Dietrich Kuss - Florenz Lammert - Michael J. Garbade - Alexander Reinbold - Gruppe Nakajima III, 2005. - http://iswww.bwl.uni-mannheim.de/Lehre/veranstaltungen/pm/Uebung/Nakajima_III_TPM.
Navarro Luis - Elola, Pastor Ana Clara - Tejedor y Mugaburu Jaime Miguel - Lacabrera Gestión integral de mantenimiento [Libro] / ed. Editores Marcombo Boixareu. - Barcelona : Marcombo Boixareu Editores, 1997. - pág. 112. - ISBN 84-267-1121-9.
Newbrough E.T. y Ramond Ramond - Personal de Administración del Mantenimiento Industrial [Libro]. - Mexico Df : Diana, 1982. - Sexta : pág. 414. - Tíyulo en inglés Effective Maintenance Management. - ISBN 968-13-0666-x.
NS@ Nist/Sematech - E-Handbook os Statistical Methods [En línea]. - September de 2005. - 29 de Abril de 2003. - Http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/.
O´Connor Patrick D.T. Practical Reliability Engineering [Libro] = Practical Reliability Engineering. - Stevenage : Wiley - Jhon Wiley & Son, 2002. - Cuarta : pág. 540. - ISBN: 0-470-84463-9.
OACI@ OACI - International Civil Aviation Organization – Organización de la Aviación Civil Internacional [En línea] // OACI - ONU Organización de las Naciones Unidas. - 2008. - Libre. - 17 de Octubre de 2008. - http://www.cinu.org.mx/onu/estructura/organismos/oaci.html.
Oiltech Mantenimiento Proactivo de sistemas mecánicos lubricados - Oiltech Analysis S.L. [Publicación periódica] = Mantenimiento Proactivo // Fluídos, olehidráulica, neumática y automación. - Madrid : [s.n.], 1995. - 208 y 209 : Vol. 24. - págs. 361-362. - ISSN 0211-1136.
OIT-CIUO88 CIUO - Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones [Libro]. - Ginebra : [s.n.], 1988.
OREDA Offshore Reliability Data Handbook [En línea]. - 1997. - http://www.dnv.com/publications/oilgas_news/articles/newoffshorereliabilitydatahandbookoreda.asp - 3rd. Det Norske Veritas – Sintef Industrial Management.
OREDA OREDA 2002 - Offshore Reliability Data [Sección del libro] = OREDA // OREDA Offshore Reliability Data. - Trondheim : OREDA & DNV Veritas, 2002. - Fourth - 2002. - ISBN 82-14-02705-5.
Otto@ Wikipedia [En línea] = Ciclo de Otto // Ciclo de Otto. - 2008. - 16 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_Otto.
Palencia Javier Antonio - Cuenca [y otros] Aplicación de sistemas expertos en el modelaje de la predicción de fallas [Conferencia] = Aplicación de sistemas expertos en el modelaje de la predicción de fallas // Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET'2006). - Mayagüez - Puerto Rico : [s.n.], 2006. - "Breaking Frontiers and Barriers in Engineering: Education, Research and Practice".
Patton Joseph D. Jr Preventive Maintenance –The International Society for Measurement and Control - Instrument Society of America [Libro]. - 1995. - Vol. Second Edition. - ISBN 1-55617-533-7.
Peterson Brad To Centralized or decentralized maintenance, central issue [En línea] // Strategic Asset Management Inc. MT-Magazine de MT-Online - Perfiles de Ingeniería. - 1999. - 1999. - http://www.camicorp.com Email bp0439@aol.com.
PilaresTPM@ Action Group [En línea] = Los Pilares del TPM (Una estrategia de implementación Lean) // Mejora Continua + RRHH + Desarrollo Organizacional. - Action Group, 2006. - 18 de Diciembre de 2008. - http://www.actiongroup.com.ar/implementar_tpm.htm.
Piotrowski@ John Why Shaft Misalignment Continues to Befuddle and Undermine Even the Best CBM and Pro-Active Maintenance Programs [En línea]. - 2001. - http://www.turvac.com/.
Pirret@ Richard Proactive calibration helps drive productivity higher - I&CS. Tel: 425-356-5277 - [En línea] = Procesos de calibración con la ayuda de tecnologías avanzadas // Chemical Onine - What's new in Process Calibration?. - 2 de Agosto de 1999. - 20 de Octubre de 2008. - http://www.chemicalonline.com/article.mvc/Whats-new-in-Process-Calibration-0001?VNETCOOKIE=NO. - Fluke Corp., POB 9090, Everett, WA 98206.
Porter Michael - E Ser competitivo [Libro] = Ser competitivo. - Bilbao : Ediciones Deusto S. A, 1999. - pág. 625. - ISBN: 84-234-1653-4.
Prahalad C.K y Hamel Gary The core competences of the corporation [Libro]. - [s.l.] : Harvard Deusto Business Review Referencia 90.311, 1991. - págs. 47-67.
RAE@ Real Academia Española [En línea] = Diccionario habla castellana // RAE@. - 2008. - 22 de Septiembre de 2008. - http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=mantener. - España.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ramakumar Ramachandra Engineering Reliability. Fundamentals and Applications [Libro] = Engineering Reliability. - New Jersey City : Editorial Prentice-Hall Professional Technical, 1996. - pág. 482. - ISBN: 0132767597.

Rath@ Ron - Moore, Ron Ingeniería y gestión del mantenimiento - Fiabilidad, Mantenibilidad y Mantenimiento Proactivo [En línea] = La combinación del TPM y del RCM // La combinación del TPM y del RCM / ed. Dialnet. - Dialnet - Universidad de la Rioja - España, Julio Agosto de 1999. - 18 de Diciembre de 2008. - www.alcion.es/Download/ArticulosPDF/gai/gratis/04articulo.pdf . - ISSN: 1695-3754.

RCMScorecard@ Reliability Centered Maintenance (RCM) Scorecard [En línea] = RCM Scorecard // RCM Scorecard. - 9 de Marzo de 2005. - Libre. - 2008. - http://www.maintenance-news.com/cgi-script/CSUpload/CSUpload.cgi?database=Reliability%20Centered%20Maintenance%20Managers'%20Forum%20Downloads.db&command=viewupload&id=1.

Reed Rudell Jr. Location, Layout y Mantenimiento de Planta [Libro] = Location, Layout, and Maintenance / ed. S.A. Pedro garcía / trad. Thomas Juan G.. - Buenos Aires : Editorial El Ateneo, 1971. - pág. 222.

Reiter William y – Lorick Harry C. Retrospective: a county's experience with maintenance management [Publicación periódica] // Review Public Works. - País estados Unidos de América : [s.n.], Abril de 1994. - ISBN 9780965618380 ISBN: B000987KYW. - pág. 66 y 67.

Reliasoft@ Reliasoft [En línea] // Reliasoft. - 2008. - 12 de Noviembre de 2008. - http://www.reliasoft.com/support/faq.htm.

Renacimiento@ Època de Renacimiento [En línea] = Época del Renacimiento // Monografías.com. - 2008. - 29 de Septiembre de 2008. - http://www.monografias.com/trabajos5/rena/rena.shtml.

Rey Sacristán Francisco Hacia la excelencia en Mantenimiento [Libro] = Hacia la excelencia en MANTENIMIENTO / ed. Tgp Hoshin S.L.. - Madrid : Tgp Hoshin, S.L., 1996. - pág. 411. - ISBN 84-87022-21-9.

Rey Sacristán Francisco TPM - Mantenimiento Total de la Producción [Libro] = TPM - Mantenimiento Total de la Producción / ed. Confemetal Fundación. - Madrid : Fundación Confemetal, 2003. - pág. 311. - 9788495428493.

Ricardo David On the principies of Political Economy and Taxation [Libro]. - Inglaterra : Ayuso, 1817.

Riis Jens O., Luxhøj James T. y Thorsteinsson Uffe A situational maintenance model [Publicación periódica] = A situational maintenance model // International Journal of Quality & Reliability Management. - Bradford - England : MCB UP Ltd, 1997. - Issue 4 : Vol. 14. - pág. 349 a 366. - Estudio EUREKA. - ISSN 0265-671X.

Roberts@ Jack TPM Total Productive History and Basic Implementation [En línea] = Manejo y Mantenimiento Productivo Total // TPM ON LINE. - 2008. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - www.tpmonline.com/article/tpm/tpmroberts.htm.

Rodolfi@ Gianni Il guasto e l´esigenza della manutenzione [En línea] // Il guasto e l´esigenza della manutenzione. - 19 de Enero de 2000. - http://www.smnweb.com/pragma/adapt98/tpm/g_tpm1.htm - http://www.smnweb.com/pragma/adapt98/tpm/g_tpm1.htm.

Rojas Jaime - Arias Introducción a la confiabilidad [Libro]. - Bogotá : Universidad de los Andes, 1975. - pág. 214.

Samuelson Paul y Nordhaus William D. Economía [Libro] = Economía. - Madrid : Editorial Mac Graw-Hill / Interamericana de España, S.A., 1996. - Décimo quinta. - ISBN 84-481-0607-5.

Santesmases Miguel - Mestre DYANE 2 Diseño y análisis de encuestas en investigación social y de mercados [Libro] = Diseño y análisis de encuestas en investigación social y de mercados - DYANE 2. - Madrid – España : Ediciones Pirámide – Grupo Editorial Anaya, 2003. - pág. 29. - ISBN: 84-368-1557-2.

Savery@ Thomas Wikipedia [En línea] = Avances Máquina Vapòr de T. Savery // Inventores del reibno Unido - Wikipediaq. - 2008. - Noviembre12 de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery.

Schultz@ Bob Un Líder sin una visión, no es más que un simple Jefe – Terry Wireman Mantenimiento clase mundia [En línea] = Mantenimiento de Clase Mundial. - 2005. - 18 de Diciembre de 2008. - http://www.tpmonline.com/articles_on_total_productive_maintenance/management/senecesitanlideres.htm.

Sherwin David J y Jonson Patrick TQM, maintenance and plant availability – Journal of Quality in Maintenance Engineering [Publicación periódica] // Journal of Quality in Maintenance Engineering. - West Yorkshire : [s.n.], 1995. - 1 : Vol. 1. - ISSN: 1355-2511.

Smith Anthony M. Reliability Centered Mantenance [Libro]. - New York : MaGraw HIll, Inc. School Education Group, 1992. - Primera. - ISBN 007059046X.

Smith Anthony M. y Hinchcliffe Glenn R. RCM - Gatewayto World Class Maintenance [Libro]. - Burlington : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. - Primera. - ISBN 0-7506-7461-X.

Smith Charles O Introduction to Reliability in Design [Libro] = Introduction to Reliability in Design. - Malabar : Robert E. Krieger Publishing Company Krieger Publishing Company, 1983. - ISBN: 0898745535.

Smith K. Modern concepts and methods in maintenance [Libro]. - USA : [s.n.], 1998.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Sotskov B Fundamentos de la Teoría del Cálculo de la Fiabilidad de Elementos y Dispositivos de Automatización y Técnica del Cálculo [Libro]. - Moscú : Editorial MIR, 1972. - pág. 264.

Sourís Jean-Paul El mantenimiento: fuente de beneficios – traducido por Diorki, S.A. Madrid de la obra original La maintenance, source de profits [Libro] = La maintenance, source de profits - ISBN 2-7081-1136-1 / trad. Traducido por Diorki S.A. Madrid de la obra original La maintenance, source de profits. - Madrid : Ediciones Díaz de Santos, S.A., 1992. - pág. 183. - ISBN 84-7978-021-5.

Stamatis D. H. Failure Mode asnd Effect Analysis - FMEA from Theory to Execution [Libro] = Failure Mode and Effect Analysis / ed. BookCrafters Inc.. - Wisconsin : ASQC Quality Press, 1995. - pág. 496. - ISBN 0-87389-300-X.

Steiner George A Planeación estratégica [Libro]. - México, DF : Compañía Editorial Continental, SA de CV, México, 1985. - Tercera impresión de febrero de 1985 : pág. 366. - ISBN 0-02-931110-1.

Táctica@ Wikipedia [En línea] = Táctica // Táctica. - 2008. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%A1ctica.

Taguchi G, Elsayed E.A y Hsiang Quality Engineering in Production System [Libro] = Quality Engineering in Production System. - New York : Editorial McGraw-Hill, 1989. - pág. 192. - ISBN-10: 0070628300, ISBN-13: 978-0070628304.

Tamborero@ José María - Del Pino Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo - España [En línea] = NTP 331: Fiabilidad - Weibull // Misnisterio del Trabajo y Asuntos Sociales - España. - Gobierno español, 2005. - Libre y en pdf. - 1 de 12 de 2008. - http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_.

Tavares Lourival Augusto - Calixto, Marco A. - Gonzaga, dos Santos Paulo R. - P. y da Silva João Esmeraldo Gestión Estratégica en Activos de Mantenimiento [Libro] = Gestión estratégica en Activos de Mantenimiento / ed. Alcántara Marco Antonio. - Mérida : Ediciones Técnicas, 2007. - Primera : pág. 180.

Tavares Lourival Augusto, Calixto Marco A. - Gonzaga y Poydo Paulo Roberto Manutenção Centrada no Negócio [Libro]. - Río de Janeiro : Novo Polo Publicações, 2005. - pág. 160. - Ley número 5988 de diciembre de 1973 Decreto 1825 de diciembre de 1987.

Thompson G. Engineering design and Terotechnology [Libro] = Engineering design and Terotechnology. - Manchester : Department of Mechanical Engineering – UMIST, 1980. - March 8 - 1980. - M601QD - U.M.I.S.T. .

Thorsteinsson Uffe, Luxhoj James T. y Riis Jens O. Trends and Perspectives in industrial Maintenance Management [Publicación periódica] = Trends and Perspectives in industrial Maintenance Management // Journal of Manufacturing Systems. - Dearborn - Michigan - USA : Universuidad de Michigan, 1997. - 6 : Vol. 16. - http://www.elsevier.com/wps/find/journaleditorialboard.cws_home/405902/editorialboard#editorialboard. - ISSN 0278-6125 .

TPM@ TPM - Manejo y Mantenimiento Productivo Total [En línea] = TPM // Wikipedia. - 2008. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/Mantenimiento_Productivo_Total.

Trofeé@ Mario Análisis ISO 14224 OREDA - Relación con RCM - FMEA [En línea] = Anaálisis ISO 14224 - OREDA // Mantenimiento Mundial. - 30 de Mayo de 2006. - 21 de Diciembre de 2008. - http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/0605MarioTroffeISO14224.pdf.

Troyer@ Drew RCM and Oil Analysis [En línea] = Reliability-Centered Maintenance and its Meaning to the Oil Analysis Professional // Maintenance Resources. - RCM and Oil Analysis - USA, Marzo de 2001. - 19 de Diciembre de 2008. - http://www.maintenanceresources.com/referencelibrary/ezine/rcm.htm. - ttp://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrary/ezine/rcm.htm#up1 .

Trujillo@ Gerardo El Mantenimiento Proactivo como una herramienta para entender la vida de los equipos - Noria Latin America - [En línea] // Noria Latinoamérica. - 1999b. - 2008. - http://www.noria.com/sp/recursos/aprendizaje/man6.asp. - E-mail: lubecons@gto1.telmex.com.m.

Trujillo@ Gerardo Implementación de un programa de Mantenimineto Proactivo - Noria Latin America [En línea] = Implementación de un programa de Mantenimineto Proactivo // Noria Latin América. - 1999a. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - lubecons@gto1.telmex.com.mx. - lubecons@gto1.telmex.com.mx.

Tsuchiya Seiji Mantenimiento de Calidad: Cero Defectos a través de la gestión del equipo [Libro] = Mantenimiento de Calidad. - USA : Productivity Press Inc, 1995. - págs. 2 - 4. - ISBN 8487022162, ISBN - 13 9788487022166.

Turner Steve OMSC International [En línea] // Planned Maintenance Optimisation / prod. Australia OMCS. - Disponible en www.pmo2000.com, 2005. - Libre. - Diciembre de 2008. - http://www.omcsinternational.com/. - ISSN: 0026-2714.

Turner@ Steve OCMS Latin America [En línea] = Optimización del plan de Manteniiento - Diferencias entre RCM y PMO // Planned Maintenance Optimisation. - 01 de Agosto de 2007. - 19 de Octubre de 2008. - http://www.confiabilidad.net/invitados/Diferencias%20entre%20PMO%20y%20RCM.pdf.

Turriano Juanelo Juanelo Turriano [En línea] = Los veinte y un libros de los ingenios y máquinas de Juanelo //

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Automatas - CPS - UNIZAR - España / prod. Biografías. - 2008. - 2008. - http://automata.cps.unizar.es/Biografias/Turriano.htm. - Nace en 1501 en Italia y muere en 1575 en España..

Uexcüll J. Von Unwelt und Innenwelt der tiere [Libro]. - Berlín – Alemania : Referenciado por Bertalanffy,1994, 1920. - Segunda Edición.

Vallejo Jaramillo Juan Santiago y Mora Gutiérrez Luis Alberto (Director) Desarrollo, validación, contraste y pronóstico del cálculo CMD - Trabajo de fin de carrera de Ingeniería Mecánica [Libro]. - Medellín : Universidad EAFIT, 2004.

Venkatesan Ravi ¿Strategic Sourcing: to make or no to make? [Publicación periódica] = ¿Strategic Sourcing: to make or no to make? // Harvard Business Review / ed. Review Harvard Business. - Boston - Massachusetts - Estados Unidos : Harvard Business Review, 1 de Noviembre de 1992. - 92610 : Vol. 59. - pág. 14 a 28. - ISSN: 1698-5117 .

Vibraciones@ DLI Engineering [En línea] = Vibraciones // www.DLIEngineering.com / ed. Engineering DLI / prod. Engineering DLI. - 2008. - 16 de Diciembre de 2008. - http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/historiadelanlisisdevibracinysuusoenelmantenimientodemaquinaria.htm.

Vitruvio Marco - Polión De Architectura - Tratado [Libro] = Arquitectura. - Madrid : Gredos, 2008. - Libro o9riginal escrito entre al año 23 y 27 antes de JusuCristo - Citado por Bautista.. - ISBN 9788424902100.

Wakefield Colin Quality assurance in maintenance - En: The South African Mechanical Engineer. [Libro]. - USA : [s.n.], 1985. - Vol. Vol 35 : pág. 68.

Watt@ James James Watt - Wikipedia [En línea] // Wikipedia Commons. - 2008. - 1 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/James_Watt.

Weiss W. H Make computarized maintenance management systems pay off – Journal Review Hydrocarbon processing [Libro]. - USA : [s.n.], 1998 .

White E. N. Terotechnology - Physical Asset Management [Libro] = Terotechnology - Physical Asset Management / ed. Manchester. - Inglaterra : [s.n.], 1975. - Libro en Biblioteca de la Universidad EAFIT.

Whorf B. L Collected Papers on Metalinguistic – Foreign Service Institute – Department of State [Libro]. - Washington – USA : Referenciado por Bertalanffy,1994, 1952.

Whorf B. L Language, Thought and reality: selected writings of B.L. Whorf – John Caroll, Ed. John Wiley & Sons [Libro]. - Nueva York – USA : Referenciado por Bertalanffy,1994, 1953.

Williamson Robert M. Focus On Results and Change the Culture Along the Way [En línea] = Focus On Results and Change the Culture Along the Way // Maintenance World. - 2008. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - http://www.maintenanceworld.com/Articles/williamsonr/focuson.html. - President of Strategic Work Systems - Email robertmw2@cs.com.

Wilson Paul F, Dell Larry D y Anderson Gaylor F Root Cause Analysis: A Tool for Total Quality Management - American Society for Quality - AAQ [Libro]. - Milwaukee : [s.n.], 1993. - pág. 216. - ISBN: 0-87389-163-5, ISBN-13: 978-0873891639 .

Wireman T Computerized Maintenance Management System. [Libro]. - [s.l.] : Editorial Industrial Press, 1994. - ISBN: 0831130547.

Wireman Terry Total Preventive Maintenance [Libro] = TPM. - Nueva York : [s.n.], 2004. - ISBN: 0831131721.

Wireman Terry Word class maintenance management [Libro]. - País Estados Unidos de América : Industrial Press, Inc., 2001. - ISBN 0-8311-3025-3.

Woodcroft Bennet The Pneumatics of Hero of Alexandria. [Libro]. - Londres : Taylor Walton and Maberly, 1851. - Citado por Bautista.

Wrennall William y Quaterman Lee - Handbook of commercial and industrial facilities management [Libro]. - New York : Editorial Mac Graw-Hill, 1994. - ISBN: 0070719357.

Wright@ Ciencia y Cultura [En línea] = El primer vuelo de los yhermanos Wright duró 12 segundos // El primer vuelo de los hermanos Wright. - 2008. - 16 de Octubre de 2008. - http://cultura.terra.es/cac/articulo/html/cac2537.htm.

Yamashina Hajime Japanese manufacturing strategy and the role of total productive maintenance TPM - Journal of Quality in Maintenance Engineering [Libro] = Japanese manufacturing strategy and the role of total productive maintenance TPM. - West Yorkshire : [s.n.], 1995. - Vol. Volumen 1 : Número 1. - ISSN: 1355-2511.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Índice Alfabético

Ahlmann H. LCC/LCP Theory and Case Studies - Department of Industrial Managment [Publicación periódica] = Beneficios del ciclo de vida útil. Un nuevo concepto de mantenimiento // Mantenimiento España / ed. Mantenimiento Asociación Española de. - Madrid : [s.n.], Marzo a Abril de 1987. - 020. - ISSN 0214-4344.

AMEF@ Análisis de Fallas [En línea] = AMEF // GestioPolis. - 2005. - Libre. - 2008. - http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/ger/amef.htm.

Annis@ Charles - P.E. Goodness-of-Fit tests for Statistical Distributions [En línea] = Goodness-of-Fit tests for Statistical Distributions // Statistical Engineering. - Enero de 2008. - 07 de Diciembre de 2008. - http://www.statisticalengineering.com/goodness.htm. - Email autor Charles.Annis@StatisticalEngineering.com.

Árbones Eduardo A. - Malinasi Logistica Empresarial [Libro]. - Barcelona : Alfaomecga Marcombo - Boxierau Editores, 1999. - pág. 5 a 24. - 970-682127-7.

Automóvil@ Wikipedia [En línea] = Historia del Automóvil // Historia del Automóvil. - 2008. - 15 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_autom%C3%B3vil.

Aven T Avialability Formula for Stand by Systems of Similar Units That Are Prevently Maintained En: IEEE Transaction and Reliability [Libro]. - [s.l.] : Transactions and Reliability, 1999. - Vol. 39 : 5.

Ávila Rubén - Espinosa Fundamentos del mantenimiento - Guías Económicas, Técnicas y Administrativas [Libro]. - Cd. de México : Limusa Grupo Noriega Editores pRIMERA REIMPRESIÓN, 1992. - Primera reimpresión. - ISBN 968-18-2528-4.

Babylon@ Dictionary of Information at your fingertips [En línea] // Baylon - Diccionario, se debe instalr en el ordenador que se use. - 2008. - 16 de Noviembre de 2008. - http://www.babylon.com. - http://www.babylon.com/affiliates/landing/download.php?id=CD5253&camp=275&lang=spa.

Bajaria H. J. Integration of Reliability, Maintainability and Quality Parameters in Design of Heavy Duty Vehicles (L. Ray Buckendale lecture) - Society of Automotives Engineers, Inc. [Libro]. - Palo Alto : Warrendale, 1983. - ISBN: 0898833043.

Ballou Ronald H. Administración de la cadena de suministro - Traducido por Carlos Mendoza Barraza y María Jesús Herrero Díaz [Libro]. - México DF : Editorial Pearson Educación, 2004. - págs. 1-32. - ISBN: 970-26-0540-7.

Barajas Oscar Mauricio - Pinzón Breve Historia de la Ingeniería - Partes 1, 2 y 3 [Publicación periódica] = Breve Historia de la Ingeniería Mecánica - Parte 1 - Parte 2 - Parte 3 // Ingenierías. - Nuevo León : [s.n.], Abril - Junio del No. 19, de Julio a Septiembre del No. 20 y de Octubre a Diciembre de 2003 del No. 21 de 2003. - 19, 20 y 21 : Vol. VI. - págs. 47-53 del número 19, 62-74 del número 20, 56-63 del número 21. - Web ingenierias.uanl.mx/19/pdf/brevehistoriadelaing.PDF. - ISSN 1405-0676.

Barlow Richard E Engineering Reliability [Libro] = Engineering Reliability. - [s.l.] : Editorial Board SIAM, 1998. - pág. 199. - ISBN: 0898714052..

Barlow Richard E y Proschan Frank Mathematical Theory of Reliability [Libro]. - New York : John Wiley & Sons, Inc, 1996. - ISBN 0898713692.

Barringer@ H. Paul. Availability, Reliability, Maintainability, and Capability [En línea] = Life Cycle Cost Issues // Availability, Reliability, Maintainability, and Capability / ed. H. Paul Barringer P.E. / prod. Barringer & Associates Inc.- Humble - Texas - USA. - 2005. - 11 de Noviembre de 2008. - http://www.barringer1.com/lcc.htm.

Bautista E. - Paz [y otros] Evolución y desarrollo de la ingeniería mecánica a través de las grandes áreas culturales [Conferencia] = Evolución y desarrollo de la ingeniería mecánica a través de las grandes áreas culturales // Octavo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. - Cusco - Perú : [s.n.], 2007. - Bautista - Trabaja en la División de Ingeniería de Máquinas de la Universidad Politécnica de Madrid de España, su email es ebautista@etsii.upm.es.

Bazovsky Igor Reliability Theory and Practice [Libro] = Reliability Theory and Practice. - [s.l.] : Edit. Dover Publications Incorporated, 2004. - pág. 304 . - ISBN: 0486438678..

Beck@ Richard Asset Management [En línea] = Acieve Best-in-Class Reliability // Meridium Inc.. - Original de la revista Chemical Engineering Progress - USA, Junio de 2003. - 18 de Diciembre de 2008. - http://www.meridium.com/news_events/articles/pdf_files/achieve_best_in_class_reliability.pdf. - www.cepmagazine.com.

Benítez Luis Eduardo - Hernández Lectura de revisión de este libro Mantenimiento Industrial Efectivo = Revisión técnica avanzada de esta obra de mantenimiento y aportes técnicos profundos. - Bogotá : Universidad nacional de Colombia, 23 de Diciembre de 2008. - El Dr. Luis Eduardo Benítez H., es en la actualidad el decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica. - Email lbenitezh@unal.edu.co.

Benítez Luis Eduardo - Hernández Opiniones y conceptos especiales sobre mantenimiento avanzado [Entrevista] = Mantenimiento industrial y sus conceptos / trad. Castellano Idioma. - Lima : Personal - IPEMAN ; Entrevista en Congreso de Mantenimiento en Lima Perú - IPEMAN ; IPEMAN, 20 de Julio de 2007. - Email lbenitezh@unal.edu.co.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Índice Alfabético

Bertalanffy Ludwing von Teoría General de los Sistemas [Libro] = Teoría General de los Sistemas. - Bogotá : Fondo de Cultura Económica Limitada, 1994. - pág. 311. - ISBN: 958-38-0011-2.

Bertalanffy1 Ludwing von Teoría General de los Sistemas - Fondo de Cultura Económica Ltda [Libro] = Teoría General de los Sistemas. - Bogotá : Fondo de Cultura Económica, 1994. - pág. 311. - ISBN: 950-557-096-1.

Bertancourt Agustín - y Molina y de Lanz José María Ensayo sobre la composición de Máquinas [Libro] / ed. Colección de Ciencias Humanidades e Ingeniería. - París : Colegio de Ingenieros, Canales y Puertos, 1802. - http://www.museoelder.org/betancourt/indexbiografia.html.

Bierman Harold, Bonini Charles P y Hausman Warren H Análisis cuantitativo para la toma de decisiones: Modelos deterministas y probabilísticas [Libro]. - Madrid : Editorial Irwin, 1991. - Octava edición. - ISBN 84-8086-273-4..

Blanchard Benjamín S, Verma Dinesh y Peterson Elmer Series Nuevas dimensiones en Ingeniería - Maintenibility: a key to effective serviceability and maintenance management [Libro] = Maintenibility. - [s.l.] : Edit. Wiley Interscience - Wiley, John & Sons, Incorporated, 1994. - pág. 560. - ISBN: 0486438678.

Blanchard Benjamín S. Ingeniería Logística – Traducido de Logistics Engineering and Maintenance – ISDEFE [Libro] = Ingeniería Logística. - Madrid : ISDEFE© - Monografías.com, 1995. - pág. 153. - ISBN: 84-89338-06X.

Bleazard Dirk, Hepler Don y Dearman Larry Equipment reliability improved at Barrick Goldstrike [Libro]. - [s.l.] : Review Mining Enginering, 1998. - Vol. 50. - ISSN 0026-5187.

Blitz@ Dictionary of Information at your fingertips [En línea] = RCM Scorecard // RCM Scorecard. - 2005. - Diciembre de 2008. - http://www.mt-online.com/articles/1004internet.cfm - http://www.babylon.com.

Bohan William F El poder oculto de la productividad [Libro] = El poder oculto de la productividad. - Bogotá : Grupo Editorial Norma - Impreso por Imprelibros S.A, 2003. - pág. 240. - ISBN 958-04-7120-7.

Boxwell Robert J. Benchmarking for competitive advantage [Libro] / ed. Hill McGraw / trad. ventaja Al castellano como Benchmarking para competir con. - Madrid : McGraw Hill Companies, Ind, 1994. - pág. 225. - ISBN: 0070068992 en inglés y en castellano ISBN: 84-481-1837-5.

Brewster J. D Simplifying the Myths About Contract Maintenance. - A.I.P.E. Facilities Review [Libro] = Simplifying the Myths About Contract Maintenance. - [s.l.] : Mcgraw HIll, 1997. - Primera : págs. 43 - 48 (662). - ISBN-10: 0070521697, ISBN-13: 978-0070521698 .

Chiavenato Idalberto Introducción A La Teoría General De La Administración [Libro] = Introducción A La Teoría General De La Administración . - Madrid : McGraw Hill, 2005. - Séptima : pág. 584. - Compra disponible en web http://www.buscalibros.cl/libro.php?libro=185295. - ISBN 9701055004.

China@ Kao Gong Ji Kaleidoscope [En línea] = Kao Gong Ji - China - Libro de las diversas artes // Cultura China Avances y desarrollos. - 2008. - 29 de September de 2008. - http://www.cultural-china.com/chinaWH/html/en/10Kaleidoscope674.html. - Años del 770 al 221 antes de JesuCristo.

ChinaABC@ CRI ON LINE [En línea] = Dinastía Song de la China // Cina ABC. - 2008. - 30 de September de 2008. - http://espanol.cri.cn/chinaabc/chapter14/chapter140108.htm.

Chute@ John R. Reliability Web.com [En línea] = Efectividad en el mantenimiento // Solution Oriente Asset Reliability / prod. Conference 18th International Maintenance. - Agosto de 2003. - 19 de Diciembre de 2008. - http://www.reliabilityweb.com/art04/right_things.htm. - www.maintenanceconference.com o en http://www.reliabilityweb.com/art04/chute.pdf.

Clement Norris C, Pool John C y Carrillo Mario M Economía enfoque: América Latina [Libro]. - Bogotá : Editorial McGraw Hill, 1984. - Segunda Edición : págs. 335-338. - ISBN: 968-451-093-4.

CPFR@ Wikipedia [En línea] = CPFR - Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment // CPFR - Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment. - 2008. - Libre. - 21 de Octubre de 2008. - http://en.wikipedia.org/wiki/CPFR.

CUIO-88-OIT, Darnell H y Smith M. Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones - Descrita por la OIT Oficina Internacional del Trabajo - Management aspects of Terotechnology - Conference of British Steel [Libro]. - Suiza, London : [s.n.], 1991. - ISBN: 92-2-306438-4.

Darnell H y Smith M. Management aspects of Terotechnology – Conference de la British Steel Corporation [Conferencia] = Management aspects of Terotechnology / ed. Corporation British Steel. - London - England : [s.n.], 1975. - Vol. Númerto 185.

De Bono Edward Seis sombreros para pensar [Libro] = Seis sombreros para pensar. - Buenos Aires : Ediciones Granica S.A., 2003. - pág. 173. - ISBN: 950-641-061-5.

De Groote Patrick D.G.S. Maintenance Internacional - Presidente de la Asociación Belga de Mantenimiento – Trends in Maintenance Management in Europe - Artículo Ponencia - Simposio Internacional de Ingeniería de Fábricas [Conferencia] // Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mantenimiento. - Medellín - Colombia : Universidad EAFIT - Medellín Colombia, 1994. - Email patrick.degroote@be.vitalo.net Cell: +32(0)495 77.77.76 Phone: +32(0)51 48.00.11.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

de Honnecourt Villard Cuaderno - Máquinas [Libro] / ed. Cantos Tres. - Madrid : AKAL S.A., 2001. - Citado por Bautista. - ISBN 9788446017769 .

De Miguel Fernández Enrique – – Servicio de Publicaciones d ntroducción a la Gestión "Management" - Volumen I y II Departamento de Organización de Empresas, Economía Financiera y Contabilidad – E.T.S.I. Industriales [Libro] / ed. Valencia Universidad Politécnica de. - Valencia : Servicio de Publicaciones de la UPV, 1990. - Vol. I y II : 2 : pág. 897. - Volumen I y II Departamento de Organización de Empresas, Economía Financiera y Contabilidad – E.T.S.I. Industriales. - ISBN: 84-7721-127-2.

Diagnetics@ What is Proactive Maintenance? [En línea]. - 1998.. - http://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrary/OilAnalysis/oa-what.htm.

Díaz Matalobos - Ángel Confiabilidad en mantenimiento [Libro] = Confiabilidad en mantenimiento. - Caracas : Ediciones IESA, C.A., 1992. - pág. 110. - ISBN: 980-271-068-2.

Diesel@ Portal Mecánico [En línea] = Motor y ciclo de Diesel por inyección // Motor Diesel. - 2008. - 15 de Octubre de 2008. - http://usuarios.lycos.es/jumping1/photoalbum.html.

Dounce Enrique - Villanueva La Productividad en el Mantenimiento Industrial [Libro]. - Cd. de México : Compañía Editorial Continental, SA de CV., 1998. - Segunda : pág. 350. - ISBN 968-26-1089-3.

Duffuaa S.O y Ben-Daya S Maintenance and quality: the mission link – Journal of Quality in Maintenance Engineering [Libro]. - West Yorkshire : [s.n.], 1995. - Vol. Volumen 1 : Número 1 : págs. 17 -18. - ISSN: 1355-2511.

Ebeling Charles E An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering [Libro] = An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering / ed. Waveland Press Inc.. - New York City : McGraw-Hill Science - Engineering - Math, 2005. - pág. 576. - ISBN: 1577663861.

EinsteinNASA@ Ciencia de la NASA [En línea] = NASA // NASA. - 2008. - 18 de Octubre de 2008. - http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2006/22mar_telomeres.htm.

Ellis@ Herman Principles of the Transformation of the Maintenance Function to World-Class Standards of Performance [En línea]. - 1999. - http://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrary/ezine/principles.htm.

ESReDa ESReDa Handook on Maintenance management [Libro] = Handook on Maintenance management / ed. ESReDa - European Safety Reliability & Data. - Hevik - Norway : DET NORSKE VERITAS - ESReDa, 2001. - Primera de 2001 : Vol. Uno : Statistical Series No. 5 : pág. 255. - Idioma Español. - ISBN: 82-515-02705.

ESReDa-Industrial Industrial Application of Strutural Realibility Theory [Libro] = Industrial Application of Strutural Realibility Theory / ed. DNV P. Thoft-Christensen - Det Norske Veritas. - Hovik : ESReDa Working Group Report, 1998. - ESReDa - European Safety, reliability and Data : Vol. ESReDa Safety Series No. 2 : pág. 283. - ISBN: 82-515-0233-0.

Evans D. W Terotechnology - How can it work [Libro]. - 1975.

Fayol Henry y Taylor Frederick Administración Industrial y General [Libro] = Administración Industrial y General / ed. Ateneo Librería El. - Buenos Aires : Librería El Ateneo, 1996. - Texto original de 1916 de fayol. - ISBN 9500-2354-04.

Fitch@ Jim Proactive Maintenance's Unruly Cousin - Machinery Lubrication Magazine [En línea]. - 2002. - http://www.machinerylubrication.com/article_detail.asp?articleid=335&relatedbookgroup=ContaminationControl .

Forcadas Jorge - Feliu Estadística aplicada a los Sistemas & Confiabilidad en los Sistemas [Publicación periódica] = Estadística en los sistemas de confiabilidad. - Medellín : Revista SAI - Revista SAI Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos – En: Revista SAI. No.4 Vol.1 – Medellín – Colombia - 1983, 1983. - 4 : Vol. 1. - pág. 41.

Ford Motor Company Reliability methods: designs verification and and production validation. Module IX = Reliability methods // North American Automotive Operations / ed. Ford. - Dearborn : Ford Motor Company, 1972. - Citado por Stamatis.

Gagné@ Robert y Bloom Benjamín Taxonomía de los Objetivos educacionales y formativos de los seres humanos [En línea] = Escalas de niveles de objetivos // Modelos de procesamiento de la información de los humanos.. - 21 de Septiembre de 2008. - 21 de Septiembre de 2008. - http://www.scribd.com/doc/408060/Robert-Gagne. - Se conoce como la escala de niveles de objetivos de Bloom, Barret y Gagné.

Gamma-Exp@ Gángara Rita Luna Distribución Exponencial - Asignatura Probabilidad y Estadística [En línea] = Distribución Exponencial . - Instituto Tecnológico de Chihuahua, 2005. - 6 de Diciembre de 2008. - http://www.itch.edu.mx/academic/industrial/sabaticorita/_private/03Distribucion%20Exponencial.htm. - Autora Rita Luna Gángara.

GammArgen@ Distribución Gamma [En línea] = Distribución Gamma // Departamento de Matemáticas - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. - Universidad de Buenos Aires - Argentina, 2005. - Libre. - 08 de Diciembre de 2008. - http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2005/1/TRANSP4C.pdf.

García Nicolás - Tapia Ventiún libros de los Ingenios - Pedro Juan de Lastanosa - Autor aragonés, de ...

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

[Libro] / ed. D.L. Instituto de Estudios AltoAAragoneses. - Aragón : Huesca, 1990. - pág. 142. - ISBN 84-86856-39-6.

Geraghty Tony RCM and TPM complementary rather than conflicting techniques [Publicación periódica] // Journal. - USA : [s.n.], Junio de 1996. - Vol. 63. - ISSN 0141-8602.

Gnedenko Boris - Vladimirovich y Ushakov Igor A. (Translator) Statistical Reliability Engineering [Libro] = Statistical Reliability Engineering. - New Cork : Editorial John Wiley & Sons, Inc., 1999. - pág. 499. - ISBN: 0471123560..

González Francisco Javier - Fernández Auditoría del manetenimiento e indicadores de gestión [Libro] = Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión / ed. ARTEGRAF S.A.. - Madrid : Fundación CONFEMETAL, 2004. - Primera : pág. 260. - ISBN: 84-96169-36-7.

Grijalbo Mondadori Gran Diccionario Enciclopédico Ilustrado [Libro] = Gran Diccionario Enciclopédico Ilustrado / ed. Grijalbo. - Barcelona : Editorial Grijalbo Mondadori, 2000. - Vol. 1 : pág. 1822. - ISBN 84-253-3157-9.

Grossman Stanley Álgebra lineal [Libro] = Álgebra lineal. - México, D.F. : Editorial McGraw Hill, 1999. - Quinta Edición. - ISBN 0673985547 ISBN-13 978-9701008904 .

Gude@ Dietmar - Poweleit, Dettlev - Psaralidis, Elena CiteSeer X Beta - Condition-based Preventive Maintenance [En línea] = Preventive maintenance strategies of semi-autonomous work groups in flexible manufacturing // Preventive maintenance strategies of semi-autonomous work groups in flexible manufacturing - Abstract. - CiteSeer X Beta, 1998. - Libre. - 18 de Diciembre de 2008. - http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.29.1104. - http://www.ergonetz.de/maintenance/downloads/gpp98.pdf.

Hair Joseph F, Anderson Ralph y Tatham Ronald Multivariate data analysis [Libro] = Multivariate data analysis. - New York : Editorial Prentice-Hall, 2005. - pág. 928. - ISBN 0130329290, ISBN-13 978-0130329295 .

HajShirmohammad Ali y Wedley William C. Maintenance management – an AHP application for centralization/decentralization [Publicación periódica] // Journal of Quality in Maintenance Engineering. - Bradford - England : Emerald Group Publishing Limited, 2004. - ISSN 1355-2511 : Vol. 10. - pág. 16 a 25.

Halpern Siegmund The Assurance Sciences: An Introduction to Quality Control and Reliability [Libro] = The Assurance Sciences. - New Jersey City : Editorial Prentice Hall, Inc Professional Technical, 1978. - ISBN: 0130496014.

Harris Gray W Living with Murphy's law - Research-Technology Management [Libro] = Living with Murphy's law. - USA : [s.n.], 1994. - Vols. Vol.37,Iss.1 : págs. 10-13.

Hecht Myron y Jady Handal An Analytical Model for Predicting The Impact of Maintenance Resource Allocation on National Airspace System Availability [Libro]. - Beverly Hills : [s.n.], 2001. - págs. 46 - 52.

Hiatt Bruce A 13 Step Program in Establishing a World Class Maintenance Organization - [En línea] // Best Practices Maintenance USA. - 2000. - 20 de Octubre de 2008. - http://www.tpmonline.com/articles/management/13steps.htm. - Email: bhiatt@anesta.com, bhiatt4419@aol.com.

Hjorth@ U. Hjorth Distribution [En línea] = Distribución Hjorth // Hjorth Distribution. - 2005. - Libre. - 1 de 12 de 2008. - http://rss.acs.unt.edu/Rdoc/library/rmutil/html/Hjorth.html. - Librios de Hjorth: Hjorth, U. (1970). An iterative linear prediction method. ZAMM 50, 445--454. - Hjorth, U. (1980). A reliability distribution with increasing, decreasing, constant and bathtubshaped failure rates. Technometrics 22, 99--109. .

Hronec Steven M. Signos Vitales - El empleo de las medidas del rendimiento, de la calidad, el tiempo y el coste para proyectar el futuro de la empresa – Arthur Andersen - [Libro] = Signos Vitales / ed. Edigrafos S.A.. - Madrid : McGraw Hill & Interamericana de España, S.A., 1995. - pág. 300. - ISBN: 0-8144-5073-3.

Hughes@ Howard Biografía de Howard Hughes [En línea] = Howard Hughes // Biografía de Howard Hughes. - 2008. - 20 de Octubre de 2008. - http://www.spartacus.schoolnet.co.uk/JFKhughesH.htm.

Husband M - Maintenance Management and Terotechnology [Libro]. - [s.l.] : Ashgate Publishing, Limited -, 1976. - ISBN: 0566001462.

Husband Tom M. Maintenance Management and Terotechnology [Libro] / ed. House Saxon. - New York : Ashgate Publishing, Limited -, 1976. - ISBN 0566-00146-2.

IATA@ IATA - International Air Transport Association – Asociación Internacional del Transporte Aéreo [En línea] = IATA // IATA. - 2008. - 17 de Octubre de 2008. - http://www.iata.org/index.htm.

Idcon@ IDCON Inc. USA [En línea] = Mantenimiento orientado por resultados // IDCON - Rayleigh - North Caroline - USA / prod. Philosophy IDCON - Approach &. - 2000. - 20 de Diciembre de 2008. - http://www.idcon.com/article-prevopti.htm. - http://www.idcon.com/IDCON-Corp-Broch.pdf.

Idhammar Christer Maintenance management: moving from reactive to results-oriented – Journal Review Pima's Papermaker [Libro]. - 1997a. - Julio. - C. Idhammar es el Presidente de IDCON, Raleigh, NC. - ISBN: 02018-00038 –.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Idhammar Christer Results Oriented MaintenanceTM Management Book [Informe] = Results Oriented MaintenanceTM Management Book - USA . - 1997b.
Idhammar@ Torbjorn - A New Preventive Maintenance Implementation and Training Concept - [En línea]. - 1999. - Libre. - 20 de Octubre de 2000. - http://maintenanceworld.com/Articles/reliability_jump_start.htm.
Ishikawa Kaoru Guía de control de Calidad /Upb138 [Libro] = Guía de control de Calidad. - [s.l.] : Editorial Quality Resources, 1985. - ISBN 089059046X.
Johnson L. P. Improvingt Equipment Reliability at Plant Efficiency through PM Optimisation at Kewaunee Nuclear power Plant [Publicación periódica] = PMO // SMRP 3rd Annual Conference / ed. - The Society for Maintenance & Reliability Professionals (SMRP). - Chicago - Illinois - Estados Unidos de América : [s.n.], Octubre de 1995.
Jones Richard Risk Based Management: A realibility – Centered Approach - Gulf Publishing Company [Libro]. - Houston : Gulf Professional Publishing, 1995. - pág. 282. - ISBN-10 0884157857, ISBN-13 978-0884157854 .
Kaplan Robert S. y Norton David P. El cuadro de mando integral – Edición Especial KPGM Latinoamérica – [Libro] = El cuadro de mando integral - Balanced Scorecard. - Barcelona : Ediciones Gestión 2000, S.A, 1997. - Primera Edición : pág. 322. - ISBN 84-8088-175-5.
Kapur Kailash C. y Lamberson Leonard R. Reliability in engineering design [Libro] = Reliability in engineering design / ed. Wayne State Univ. Detroit, MI (USA). Dept. of Industrial Engineering and Operations Research. - Detroit USA : John Wiley and Sons, Inc.,New York, 1977. - Primera : pág. 606. - Org Wayne State Univ., Detroit, MI (USA). Dept. of Industrial Engineering and Operations Research. - ISBN-13: 978-0-471-51191-5.
Kececioglu Dimitri Maintainability, Availability, & Operational Readiness Engineering [Libro] = Maintainability. - New Jersey City : Editorial Prentice-Hall Professional Technical, 1995. - ISBN: 0135736277.
Kelly Anthony y Harris M. J. Gestión del MantenimientoIndustrial [Libro] = Gestión del Mantenimiento Industrial / ed. Gráficas Mar-Car S.A.. - Madrid : Fundación REPSOL Publicaciones e Impreso en Gráficas del Mar – Traducido por Gerardo Álvarez Cuervo y equipo de trabajo, 1998. - pág. 218. - ISBN: 84-923506-0-1 – T.
Kiyosaki Robert T y Lechter Sharon L. Padre rico, padre pobre [Libro] = Padre Rico, Padre Pobre / ed. Gold Press Inc.. - Buenos Aires : Time & Monkey Network Editions, 2000. - pág. 220. - ISBN 987-97024-5-X ó 0-943856-1-9.
Klusman Robert A Establishing Proactive Maintenance Management – Review Journal - Water / Engineering & Management [Libro]. - USA : [s.n.], 1995. - págs. 18 - 20.
Knezevic Jezdimir Mantenibilidad [Libro] = Mantenibilidad. - Madrid : Editorial ISDEFE, 1996. - ISBN: 84-89338-08-6.
Kume Hitochi Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad [Libro] = Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad. - Bogotá : Grupo Editorial Norma, 1992. - págs. 171 - 172. - ISBN: 958-041541-2.
Ladiray Dominique y Quenneville Benoît Methodologica [Publicación periódica] = DESESTACIONALIZAR CON EL MÉTODO X-11 // REVUE DES TECHNIQUES, MÉTHODES ET INSTRUMENTS DE RECHERCHE EN SCIENCES HUMAINES / ed. BRUXELLES Laboratoire de Méthodologie du Traitement des Données - UNIVERSITÉ LIBRE DE. - Bruxelles - Belgique : REVUE DES TECHNIQUES, MÉTHODES ET INSTRUMENTS, Abril de 2000. - 200 - 2001 - Nos. 8 - 9. - pág. 236. - Traducción al castellano: Eduardo CRIVISQUI - Véase sección 2.2. - ISSN: 0778-7553.
Langan George Maintenance automation – Review I.I.E. Solutions [Libro] = Maintenance automation . - USA : [s.n.], 1995. - Vol. Volumen 27 : No. 7 : págs. 14-17..
Latino Robert Applied Industrial Training Pays-off. [En línea] = Applied Industrial Training Pays-off. // Maintenance Technology. - Junio de 1999b. - Libre. - 15 de Octubre de 2008. - http://www.reliability.com/article25.htm.
Latino@ Robert The failure dilemma [En línea] = The failure dilemma // Reliability Center, Inc.. - Agosto de 1999a. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - http://www.reliability.com/article18.htm or http://www.maintenanceresources.com/referencelibrary/failureanalysis/dilemma.htm.
Leemis Lawrence M Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods [Libro] = Reliability. - New Jersey City : Editorial Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, 1995. - ISBN: 0-13-720517-1.
Levin Richard Estadistica para Administradores [Libro] = Estadistica para Administradores . - Cd. de México : Prentice Hall , 1996. - pág. 1171. - Trata bien el teorema del límite central. - ISBN: 978-9688806753.
Lewis Elmer E. Introduction to Reliability Engineering [Libro]. - [s.l.] : Editorial John Wiley & Sons, Inc, 1995. - Segunda : pág. 435. - ISBN: 0471018333.
Lorick Harry y Varela Steve Infraestructure Maintenance System [Publicación periódica] // Review Public

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Works / ed. Works Review Public. - País Estados Unidos : [s.n.], Mayo de 1998. - pág. 46 y 47. - ISBN 9780965618380. - ISBN: B000987KYW.

Marks John Combining TPM and reliability-focused maintenance (RCM), reliability centered maintenance, electric maintenance & repair [Libro]. - USA : [s.n.], 1997. - Vol. Volumen 211 : págs. 49 - 52. - ISSN 0013-4457.

Mather Daryl The Maintenance Scorecard - Creating Strategic Advantage [Libro] = Maintenance Scorecard / ed. Carleo John. - New York : Industrial Press, Inc., 2005. - pág. 257.

Modarres Mohammed What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk Analysis [Libro] = What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk Analysis. - New York City : Editorial Marcel Dekker, 1993. - pág. 351. - ISBN: 082478958X.

Molinero@ Luis M. Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión [En línea] = Análisis de series temporales // Liga Española para la lucha contra la Hipertensión Arterial. - Alce Ingeniería, Enero de 2004. - Libre. - 12 de Diciembre de 2008. - http://www.seh-lelha.org/tseries.htm. - Email estadistica@alceingenieria.net.

Moore@ Clive Maintability,Another Maintenance Improvement Opportunity [revisado Agosto de 2001 por toro y otro] [En línea] // TPM ON LINE. - 2001. - 2001. - http://www.tpmonline.com /articles_on_total_productive_maintenance/reliability/maintainability.htm>.

Moore@ Ron - Rath, Ron Fiabilidad, Mantenibilidad y Mantenimiento Proactivo [En línea] = La combinación del TPM y el RCM. // La combinación de TPM y RCM. Estudio de un caso práctico. - Gestión de Activos - Industriales, 2008. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - www.alcion.es/Download/ArticulosPDF/gai/gratis/04articulo.pdf .

Mora Alberto - Gutiérrez ¿…Será factible medir la gestión gerencial del mantenimiento…? – Universidad EAFIT – Revista Universidad EAFIT Escuela de Administración y Finanzas y Tecnologías [Libro] = ¿…Será factible medir la gestión gerencial del mantenimiento…? / ed. EAFIT. - Medellín : Universidad EAFIT, 1990c. - Número 0079 : págs. 45 - 65. - ISSN: 0120-341X.

Mora Alberto - Gutiérrez ¿Cómo dimensionar el futuro de una empresa de servicios de mantenimiento? – ACIEM – Revista ACIEM Asociación Colombiana de Ingenieros Electricistas, Mecánicos, Electrónicos y Afines [Libro]. - Bogotá : [s.n.], 1998a. - Vol. Número 09 : págs. 40 - 43.

Mora Alberto - Gutiérrez Mantenimiento Estratégico Empresarial [Libro] = Mantenimiento Estratégico Empresarial. - Medellín : Fondo Editorial FONEFIT, 2007b. - Primera : pág. 345. - ISBN 978-958-8281-46-9.

Mora Alberto - Gutiérrez Mantenimiento Estratégico para empresas industriales o de servicios [Libro] = Mantenimiento Estratégico. - Envigado : AMG, 2007a. - Segunda : pág. 306. - ISBN 978-958-3382185.

Mora Alberto - Gutiérrez Modelo sistematizado de gerencia y administración del mantenimiento industrial - Tesis Investigación para optar al título de Magister en Administración [Libro] = Modelo sistematizado de gerencia y administración del mantenimiento indutrial. - Medellín : [s.n.], 1990. - pág. 254. - Tesis de Magister de Administración de Empresas . Universidad EAFIT Colombia.

Mora Alberto - Gutiérrez Planeación estratégica de alta dirección en empresas de mantenimiento - ACIEM [Libro]. - Bogotá : Revista ACIEM Asociación Colombiana de Ingenieros Electricistas, Mecánicos, Electrónicos y Afines, 1995. - Número 077.

Mora Alberto - Gutiérrez Pronósticos de demanda e Inventarios - Métodos Futurísticos [Publicación periódica] = Pronósticos / ed. Ediciones Ultragráficas. - Medellín : AMG, Diciembre de 2007c. - ISBN: 978-958-44-0233-2 .

Mora Alberto - Gutiérrez Selección y jerarquización de las variables importantes para la gestión de mantenimiento en empresas usuarias o generadoras de tecnologías avanzadas [Informe] = Mantenimiento industrial en empresas de tecnologías avanzadas : Tesis de doctorado - Ph.D. en Ingeniería Industrial Cum Laude / Organización de Empresas ; Universidad Politécnica de Valencia. - Valencia : [s.n.], 1999.

Mora Alberto - Gutiérrez Selección y jerarquización de las variables importantes para la gestión de mantenimiento en empresas usuarias o generadoras de tecnologías avanzadas [Libro] = Mantenimiento en empresas de alta tecnología. - Valencia : Escuela de Ingenieros Industriales U.P.V., 1999. - pág. 370.

Mora Alberto - Gutiérrez, Pérez Anastasi - Peral y Ortiz Germán - Plata Indicadores de Gestión y Operación del Mantenimiento?_ ¡No!... ¡Gestar y Operar el Mantenimiento a partir de Indicadores Futuros!– Revista de la Comisión de Integración Energética Regional Americana [Libro]. - Montevideo – Uruguay : CIER – Sin fronteras para la energía, 2003. - ISSN: 0379-850X.

Morris@ Charles E. You can bank on it - Proactive maintenance [En línea] // Food Engineering - Highlands Ranch / ed. Engineering Food. - July - August de 1999. - 2006.

Motor@ Wikipedia [En línea] = Motor de Combustión // Motor de Combustión Interna. - 2008. - 16 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_combusti%C3%B3n_interna.

Moubray John Mitchell RCM Reliability Centered Maintenance - Industrial Press Inc [Libro] / ed. Biddles Limited Guilford and Rob Lockhart / trad. Ellman Sueiro y Asociados - Argentina. - Leicestershire : Aladon

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Limited, 2004. - Primera en castellano : pág. 433. - ISBN 09539603-2-3.
Moubray@ John. About RCM [En línea] = RCM // Aladon inglaterra. - ALADON RCM, 2001. - Libre. - 19 de Diciembre de 2008. - http://www.aladon.co.uk/02rcm.htm.
Nachlas Joel Fiabilidad [Libro] = Fiabilidad. - Madrid : ISDEFE, 1995. - ISBN: 84-89338-07-8.
Nakajima Seiichi [y otros] Introducción al TPM Programa Para El Desarrollo [Libro] = Introducción al TPM Programa Para El Desarrollo / trad. Alvarez Traducido por Antonio Cuesta. - Madrid : Editorial Fundación REPSOL Publicaciones e Impreso en Gráficas del Mar, 1991. - ISBN: 84-87022-81-2.
Nakajima5S@ Total Productive Maintenance [En línea]. - Alexander Witt - Dietrich Kuss - Florenz Lammert - Michael J. Garbade - Alexander Reinbold - Gruppe Nakajima III, 2005. - http://iswww.bwl.uni-mannheim.de/Lehre/veranstaltungen/pm/Uebung/Nakajima_III_TPM.
Navarro Luis - Elola, Pastor Ana Clara - Tejedor y Mugaburu Jaime Miguel - Lacabrera Gestión integral de mantenimiento [Libro] / ed. Editores Marcombo Boixareu. - Barcelona : Marcombo Boixareu Editores, 1997. - pág. 112. - ISBN 84-267-1121-9.
Newbrough E.T. y Ramond Ramond - Personal de Administración del Mantenimiento Industrial [Libro]. - Mexico Df : Diana, 1982. - Sexta : pág. 414. - Tíyulo en inglés Effective Maintenance Management. - ISBN 968-13-0666-x.
NS@ Nist/Sematech - E-Handbook os Statistical Methods [En línea]. - September de 2005. - 29 de Abril de 2003. - Http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/.
O´Connor Patrick D.T. Practical Reliability Engineering [Libro] = Practical Reliability Engineering. - Stevenage : Wiley - Jhon Wiley & Son, 2002. - Cuarta : pág. 540. - ISBN: 0-470-84463-9.
OACI@ OACI - International Civil Aviation Organization – Organización de la Aviación Civil Internacional [En línea] // OACI - ONU Organización de las Naciones Unidas. - 2008. - Libre. - 17 de Octubre de 2008. - http://www.cinu.org.mx/onu/estructura/organismos/oaci.html.
Oiltech Mantenimiento Proactivo de sistemas mecánicos lubricados - Oiltech Analysis S.L. [Publicación periódica] = Mantenimiento Proactivo // Fluídos, olehidráulica, neumática y automación. - Madrid : [s.n.], 1995. - 208 y 209 : Vol. 24. - págs. 361-362. - ISSN 0211-1136.
OIT-CIUO88 CIUO - Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones [Libro]. - Ginebra : [s.n.], 1988.
OREDA Offshore Reliability Data Handbook [En línea]. - 1997. - http://www.dnv.com/publications/oilgas_news/articles/newoffshorereliabilitydatahandbookoreda.asp - 3rd. Det Norske Veritas – Sintef Industrial Management.
OREDA OREDA 2002 - Offshore Reliability Data [Sección del libro] = OREDA // OREDA Offshore Reliability Data. - Trondheim : OREDA & DNV Veritas, 2002. - Fourth - 2002. - ISBN 82-14-02705-5.
Otto@ Wikipedia [En línea] = Ciclo de Otto // Ciclo de Otto. - 2008. - 16 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_Otto.
Palencia Javier Antonio - Cuenca [y otros] Aplicación de sistemas expertos en el modelaje de la predicción de fallas [Conferencia] = Aplicación de sistemas expertos en el modelaje de la predicción de fallas // Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET'2006). - Mayagüez - Puerto Rico : [s.n.], 2006. - "Breaking Frontiers and Barriers in Engineering: Education, Research and Practice".
Patton Joseph D. Jr Preventive Maintenance –The International Society for Measurement and Control - Instrument Society of America [Libro]. - 1995. - Vol. Second Edition. - ISBN 1-55617-533-7.
Peterson Brad To Centralized or decentralized maintenance, central issue [En línea] // Strategic Asset Management Inc. MT-Magazine de MT-Online - Perfiles de Ingeniería. - 1999. - 1999. - http://www.camicorp.com Email bp0439@aol.com.
PilaresTPM@ Action Group [En línea] = Los Pilares del TPM (Una estrategia de implementación Lean) // Mejora Continua + RRHH + Desarrollo Organizacional. - Action Group, 2006. - 18 de Diciembre de 2008. - http://www.actiongroup.com.ar/implementar_tpm.htm.
Piotrowski@ John Why Shaft Misalignment Continues to Befuddle and Undermine Even the Best CBM and Pro-Active Maintenance Programs [En línea]. - 2001. - http://www.turvac.com/.
Pirret@ Richard Proactive calibration helps drive productivity higher - I&CS. Tel: 425-356-5277 - [En línea] = Procesos de calibración con la ayuda de tecnologías avanzadas // Chemical Onine - What's new in Process Calibration?. - 2 de Agosto de 1999. - 20 de Octubre de 2008. - http://www.chemicalonline.com/article.mvc/Whats-new-in-Process-Calibration-0001?VNETCOOKIE=NO. - Fluke Corp., POB 9090, Everett, WA 98206.
Porter Michael - E Ser competitivo [Libro] = Ser competitivo. - Bilbao : Ediciones Deusto S. A, 1999. - pág. 625. - ISBN: 84-234-1653-4.
Prahalad C.K y Hamel Gary The core competences of the corporation [Libro]. - [s.l.] : Harvard Deusto Business Review Referencia 90.311, 1991. - págs. 47-67.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

RAE@ Real Academia Española [En línea] = Diccionario habla castellana // RAE@. - 2008. - 22 de Septiembre de 2008. - http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=mantener. - España.

Ramakumar Ramachandra Engineering Reliability. Fundamentals and Applications [Libro] = Engineering Reliability. - New Jersey City : Editorial Prentice-Hall Professional Technical, 1996. - pág. 482. - ISBN: 0132767597.

Rath@ Ron - Moore, Ron Ingeniería y gestión del mantenimiento - Fiabilidad, Mantenibilidad y Mantenimiento Proactivo [En línea] = La combinación del TPM y del RCM // La combinación del TPM y del RCM / ed. Dialnet. - Dialnet - Universidad de la Rioja - España, Julio Agosto de 1999. - 18 de Diciembre de 2008. - www.alcion.es/Download/ArticulosPDF/gai/gratis/04articulo.pdf . - ISSN: 1695-3754.

RCMScorecard@ Reliability Centered Maintenance (RCM) Scorecard [En línea] = RCM Scorecard // RCM Scorecard. - 9 de Marzo de 2005. - Libre. - 2008. - http://www.maintenance-news.com/cgi-script/CSUpload/CSUpload.cgi?database=Reliability%20Centered%20Maintenance%20Managers'%20Forum%20Downloads.db&command=viewupload&id=1.

Reed Rudell Jr. Location, Layout y Mantenimiento de Planta [Libro] = Location, Layout, and Maintenance / ed. S.A. Pedro garcía / trad. Thomas Juan G.. - Buenos Aires : Editorial El Ateneo, 1971. - pág. 222.

Reiter William y – Lorick Harry C. Retrospective: a county's experience with maintenance management [Publicación periódica] // Review Public Works. - País estados Unidos de América : [s.n.], Abril de 1994. - ISBN 9780965618380 ISBN: B000987KYW. - pág. 66 y 67.

Reliasoft@ Reliasoft [En línea] // Reliasoft. - 2008. - 12 de Noviembre de 2008. - http://www.reliasoft.com/support/faq.htm.

Renacimiento@ Època de Renacimiento [En línea] = Época del Renacimiento // Monografías.com. - 2008. - 29 de Septiembre de 2008. - http://www.monografias.com/trabajos5/rena/rena.shtml.

Rey Sacristán Francisco Hacia la excelencia en Mantenimiento [Libro] = Hacia la excelencia en MANTENIMIENTO / ed. Tgp Hoshin S.L.. - Madrid : Tgp Hoshin, S.L., 1996. - pág. 411. - ISBN 84-87022-21-9.

Rey Sacristán Francisco TPM - Mantenimiento Total de la Producción [Libro] = TPM - Mantenimiento Total de la Producción / ed. Confemetal Fundación. - Madrid : Fundación Confemetal, 2003. - pág. 311. - 9788495428493.

Ricardo David On the principies of Political Economy and Taxation [Libro]. - Inglaterra : Ayuso, 1817.

Riis Jens O., Luxhøj James T. y Thorsteinsson Uffe A situational maintenance model [Publicación periódica] = A situational maintenance model // International Journal of Quality & Reliability Management. - Bradford - England : MCB UP Ltd, 1997. - Issue 4 : Vol. 14. - pág. 349 a 366. - Estudio EUREKA. - ISSN 0265-671X.

Roberts@ Jack TPM Total Productive History and Basic Implementation [En línea] = Manejo y Mantenimiento Productivo Total // TPM ON LINE. - 2008. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - www.tpmonline.com/article/tpm/tpmroberts.htm.

Rodolfi@ Gianni Il guasto e l´esigenza della manutenzione [En línea] // Il guasto e l´esigenza della manutenzione. - 19 de Enero de 2000. - http://www.smnweb.com/pragma/adapt98/tpm/g_tpm1.htm - http://www.smnweb.com/pragma/adapt98/tpm/g_tpm1.htm.

Rojas Jaime - Arias Introducción a la confiabilidad [Libro]. - Bogotá : Universidad de los Andes, 1975. - pág. 214.

Samuelson Paul y Nordhaus William D. Economía [Libro] = Economía. - Madrid : Editorial Mac Graw-Hill / Interamericana de España, S.A., 1996. - Décimo quinta. - ISBN 84-481-0607-5.

Santesmases Miguel - Mestre DYANE 2 Diseño y análisis de encuestas en investigación social y de mercados [Libro] = Diseño y análisis de encuestas en investigación social y de mercados - DYANE 2. - Madrid – España : Ediciones Pirámide – Grupo Editorial Anaya, 2003. - pág. 29. - ISBN: 84-368-1557-2.

Savery@ Thomas Wikipedia [En línea] = Avances Máquina Vapòr de T. Savery // Inventores del reibno Unido - Wikipediaq. - 2008. - Noviembre12 de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery.

Schultz@ Bob Un Líder sin una visión, no es más que un simple Jefe – Terry Wireman Mantenimiento clase mundia [En línea] = Mantenimiento de Clase Mundial. - 2005. - 18 de Diciembre de 2008. - http://www.tpmonline.com/articles_on_total_productive_maintenance/management/senecesitanlideres.htm.

Sherwin David J y Jonson Patrick TQM, maintenance and plant availability – Journal of Quality in Maintenance Engineering [Publicación periódica] // Journal of Quality in Maintenance Engineering. - West Yorkshire : [s.n.], 1995. - 1 : Vol. 1. - ISSN: 1355-2511.

Smith Anthony M. Reliability Centered Mantenance [Libro]. - New York : MaGraw HIll, Inc. School Education Group, 1992. - Primera. - ISBN 007059046X.

Smith Anthony M. y Hinchcliffe Glenn R. RCM - Gatewayto World Class Maintenance [Libro]. - Burlington : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. - Primera. - ISBN 0-7506-7461-X.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Smith Charles O Introduction to Reliability in Design [Libro] = Introduction to Reliability in Design. - Malabar : Robert E. Krieger Publishing Company Krieger Publishing Company, 1983. - ISBN: 0898745535.
Smith K. Modern concepts and methods in maintenance [Libro]. - USA : [s.n.], 1998.
Sotskov B Fundamentos de la Teoría del Cálculo de la Fiabilidad de Elementos y Dispositivos de Automatización y Técnica del Cálculo [Libro]. - Moscú : Editorial MIR, 1972. - pág. 264.
Sourís Jean-Paul El mantenimiento: fuente de beneficios – traducido por Diorki, S.A. Madrid de la obra original La maintenance, source de profits [Libro] = La maintenance, source de profits - ISBN 2-7081-1136-1 / trad. Traducido por Diorki S.A. Madrid de la obra original La maintenance, source de profits. - Madrid : Ediciones Díaz de Santos, S.A., 1992. - pág. 183. - ISBN 84-7978-021-5.
Stamatis D. H. Failure Mode asnd Effect Analysis - FMEA from Theory to Execution [Libro] = Failure Mode and Effect Analysis / ed. BookCrafters Inc.. - Wisconsin : ASQC Quality Press, 1995. - pág. 496. - ISBN 0-87389-300-X.
Steiner George A Planeación estratégica [Libro]. - México, DF : Compañía Editorial Continental, SA de CV, México, 1985. - Tercera impresión de febrero de 1985 : pág. 366. - ISBN 0-02-931110-1.
Táctica@ Wikipedia [En línea] = Táctica // Táctica. - 2008. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%A1ctica.
Taguchi G, Elsayed E.A y Hsiang Quality Engineering in Production System [Libro] = Quality Engineering in Production System. - New York : Editorial McGraw-Hill, 1989. - pág. 192. - ISBN-10: 0070628300, ISBN-13: 978-0070628304.
Tamborero@ José María - Del Pino Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo - España [En línea] = NTP 331: Fiabilidad - Weibull // Misnisterio del Trabajo y Asuntos Sociales - España. - Gobierno español, 2005. - Libre y en pdf. - 1 de 12 de 2008. - http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_.
Tavares Lourival Augusto - Calixto, Marco A. - Gonzaga, dos Santos Paulo R. - P. y da Silva João Esmeraldo Gestión Estratégica en Activos de Mantenimiento [Libro] = Gestión estratégica en Activos de Mantenimiento / ed. Alcántara Marco Antonio. - Mérida : Ediciones Técnicas, 2007. - Primera : pág. 180.
Tavares Lourival Augusto, Calixto Marco A. - Gonzaga y Poydo Paulo Roberto Manutenção Centrada no Negócio [Libro]. - Río de Janeiro : Novo Polo Publicações, 2005. - pág. 160. - Ley número 5988 de diciembre de 1973 Decreto 1825 de diciembre de 1987.
Thompson G. Engineering design and Terotechnology [Libro] = Engineering design and Terotechnology. - Manchester : Department of Mechanical Engineering – UMIST, 1980. - March 8 - 1980. - M601QD - U.M.I.S.T. .
Thorsteinsson Uffe, Luxhoj James T. y Riis Jens O. Trends and Perspectives in industrial Maintenance Management [Publicación periódica] = Trends and Perspectives in industrial Maintenance Management // Journal of Manufacturing Systems. - Dearborn - Michigan - USA : Universuidad de Michigan, 1997. - 6 : Vol. 16. - http://www.elsevier.com/wps/find/journaleditorialboard.cws_home/405902/editorialboard#editorialboard. - ISSN 0278-6125 .
TPM@ TPM - Manejo y Mantenimiento Productivo Total [En línea] = TPM // Wikipedia. - 2008. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/Mantenimiento_Productivo_Total.
Trofeé@ Mario Análisis ISO 14224 OREDA - Relación con RCM - FMEA [En línea] = Anaálisis ISO 14224 - OREDA // Mantenimiento Mundial. - 30 de Mayo de 2006. - 21 de Diciembre de 2008. - http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/0605MarioTroffeISO14224.pdf.
Troyer@ Drew RCM and Oil Analysis [En línea] = Reliability-Centered Maintenance and its Meaning to the Oil Analysis Professional // Maintenance Resources. - RCM and Oil Analysis - USA, Marzo de 2001. - 19 de Diciembre de 2008. - http://www.maintenanceresources.com/referencelibrary/ezine/rcm.htm. - ttp://www.maintenanceresources.com/ReferenceLibrary/ezine/rcm.htm#up1 .
Trujillo@ Gerardo El Mantenimiento Proactivo como una herramienta para entender la vida de los equipos - Noria Latin America - [En línea] // Noria Latinoamérica. - 1999b. - 2008. - http://www.noria.com/sp/recursos/aprendizaje/man6.asp. - E-mail: lubecons@gto1.telmex.com.m.
Trujillo@ Gerardo Implementación de un programa de Mantenimineto Proactivo - Noria Latin America [En línea] = Implementación de un programa de Mantenimineto Proactivo // Noria Latin América. - 1999a. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - lubecons@gto1.telmex.com.mx. - lubecons@gto1.telmex.com.mx.
Tsuchiya Seiji Mantenimiento de Calidad: Cero Defectos a través de la gestión del equipo [Libro] = Mantenimiento de Calidad. - USA : Productivity Press Inc, 1995. - págs. 2 - 4. - ISBN 8487022162, ISBN - 13 9788487022166.
Turner Steve OMSC International [En línea] // Planned Maintenance Optimisation / prod. Australia OMCS. - Disponible en www.pmo2000.com, 2005. - Libre. - Diciembre de 2008. - http://www.omcsinternational.com/. - ISSN: 0026-2714.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Turner@ Steve OCMS Latin America [En línea] = Optimización del plan de Manteniiento - Diferencias entre RCM y PMO // Planned Maintenance Optimisation. - 01 de Agosto de 2007. - 19 de Octubre de 2008. - http://www.confiabilidad.net/invitados/Diferencias%20entre%20PMO%20y%20RCM.pdf.

Turriano Juanelo Juanelo Turriano [En línea] = Los veinte y un libros de los ingenios y máquinas de Juanelo // Automatas - CPS - UNIZAR - España / prod. Biografías. - 2008. - 2008. - http://automata.cps.unizar.es/Biografias/Turriano.htm. - Nace en 1501 en Italia y muere en 1575 en España..

Uexcüll J. Von Unwelt und Innenwelt der tiere [Libro]. - Berlín – Alemania : Referenciado por Bertalanffy,1994, 1920. - Segunda Edición.

Vallejo Jaramillo Juan Santiago y Mora Gutiérrez Luis Alberto (Director) Desarrollo, validación, contraste y pronóstico del cálculo CMD - Trabajo de fin de carrera de Ingeniería Mecánica [Libro]. - Medellín : Universidad EAFIT, 2004.

Venkatesan Ravi ¿Strategic Sourcing: to make or no to make? [Publicación periódica] = ¿Strategic Sourcing: to make or no to make? // Harvard Business Review / ed. Review Harvard Business. - Boston - Massachusetts - Estados Unidos : Harvard Business Review, 1 de Noviembre de 1992. - 92610 : Vol. 59. - pág. 14 a 28. - ISSN: 1698-5117 .

Vibraciones@ DLI Engineering [En línea] = Vibraciones // www.DLIEngineering.com / ed. Engineering DLI / prod. Engineering DLI. - 2008. - 16 de Diciembre de 2008. - http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/historiadelanlisisdevibracinysuusoenelmantenimientodemaquinaria.htm.

Vitruvio Marco - Polión De Architectura - Tratado [Libro] = Arquitectura. - Madrid : Gredos, 2008. - Libro o9riginal escrito entre al año 23 y 27 antes de JusuCristo - Citado por Bautista.. - ISBN 9788424902100.

Wakefield Colin Quality assurance in maintenance - En: The South African Mechanical Engineer. [Libro]. - USA : [s.n.], 1985. - Vol. Vol 35 : pág. 68.

Watt@ James James Watt - Wikipedia [En línea] // Wikipedia Commons. - 2008. - 1 de Octubre de 2008. - http://es.wikipedia.org/wiki/James_Watt.

Weiss W. H Make computarized maintenance management systems pay off – Journal Review Hydrocarbon processing [Libro]. - USA : [s.n.], 1998 .

White E. N. Terotechnology - Physical Asset Management [Libro] = Terotechnology - Physical Asset Management / ed. Manchester. - Inglaterra : [s.n.], 1975. - Libro en Biblioteca de la Universidad EAFIT.

Whorf B. L Collected Papers on Metalinguistic – Foreign Service Institute – Department of State [Libro]. - Washington – USA : Referenciado por Bertalanffy,1994, 1952.

Whorf B. L Language, Thought and reality: selected writings of B.L. Whorf – John Caroll, Ed. John Wiley & Sons [Libro]. - Nueva York – USA : Referenciado por Bertalanffy,1994, 1953.

Williamson Robert M. Focus On Results and Change the Culture Along the Way [En línea] = Focus On Results and Change the Culture Along the Way // Maintenance World. - 2008. - Libre. - 20 de Octubre de 2008. - http://www.maintenanceworld.com/Articles/williamsonr/focuson.html. - President of Strategic Work Systems - Email robertmw2@cs.com.

Wilson Paul F, Dell Larry D y Anderson Gaylor F Root Cause Analysis: A Tool for Total Quality Management - American Society for Quality - AAQ [Libro]. - Milwaukee : [s.n.], 1993. - pág. 216. - ISBN: 0-87389-163-5, ISBN-13: 978-0873891639 .

Wireman T Computerized Maintenance Management System. [Libro]. - [s.l.] : Editorial Industrial Press, 1994. - ISBN: 0831130547.

Wireman Terry Total Preventive Maintenance [Libro] = TPM. - Nueva York : [s.n.], 2004. - ISBN: 0831131721.

Wireman Terry Word class maintenance management [Libro]. - País Estados Unidos de América : Industrial Press, Inc., 2001. - ISBN 0-8311-3025-3.

Woodcroft Bennet The Pneumatics of Hero of Alexandria. [Libro]. - Londres : Taylor Walton and Maberly, 1851. - Citado por Bautista.

Wrennall William y Quaterman Lee - Handbook of commercial and industrial facilities management [Libro]. - New York : Editorial Mac Graw-Hill, 1994. - ISBN: 0070719357.

Wright@ Ciencia y Cultura [En línea] = El primer vuelo de los yhermanos Wright duró 12 segundos // El primer vuelo de los hermanos Wright. - 2008. - 16 de Octubre de 2008. - http://cultura.terra.es/cac/articulo/html/cac2537.htm.

Yamashina Hajime Japanese manufacturing strategy and the role of total productive maintenance TPM - Journal of Quality in Maintenance Engineering [Libro] = Japanese manufacturing strategy and the role of total productive maintenance TPM. - West Yorkshire : [s.n.], 1995. - Vol. Volumen 1 : Número 1. - ISSN: 1355-2511.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Índice Alfabético

5

5S, 55, 214, 217, 218, 219

A

Acciones, 16, 26, 27, 28, 30, 31, 35, 36, 37, 40, 43, 47, 48, 51, 52, 55, 58, 78, 85, 86, 87, 94, 111, 119, 175, 176, 178, 179, 180, 181, 182, 201, 202, 204, 205, 212, 214, 215, 218, 221, 222, 233, 238, 239, 242, 243, 244, 255, 285, 290, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 307, 309, 311, 314, 318, 320, 321, 322, 324, 326, 327
Acciones correctivas, 55, 179, 298
Acciones preventivas, 299
agotados, 257, 258
Alcanzada, 30, 59, 60, 67, 68, 71, 72, 73, 77
aleatoriedad, 189, 191
AR.I.MA, 186, 187, 189, 190, 191, 192
AR.I.MA., 187, 190, 191

B

Bañera, 148, 185
Bondad de ajuste, 91, 95, 125, 130, 138, 152, 155, 166, 174, 185
Box - Jenkins, 192
Brown, 189

C

CMD, 28, 30, 40, 55, 56, 58, 60, 61, 67, 79, 84, 85, 86, 104, 111, 152, 156, 165, 176, 182, 185, 194, 195, 201, 202, 203, 212, 221, 224, 234, 235, 303, 304, 305, 315, 322, 323, 324, 325, 326, 328
coeficientes, 191
coeficientes de auto correlación, 191
competitividad, 28, 29, 32, 40, 42, 43, 205
Confiabilidad, 16, 17, 28, 30, 31, 32, 33, 35, 38, 39, 40, 43, 49, 53, 56, 57, 58, 63, 67, 71, 72, 78, 79, 80, 81, 84, 85, 86, 87, 88, 91, 92, 94, 95, 96, 100, 101, 104, 106, 107, 111, 112, 113, 114, 116, 120, 122, 124, 125, 126, 129, 130, 131, 134, 135, 140, 147, 149, 156, 157, 158, 159, 160, 162, 174, 176, 177, 178, 194, 202, 203, 204, 229, 234, 298, 299, 303, 304, 305, 307, 308, 309, 312, 313, 315, 316, 322, 324, 326
correlación, 191
costos, 258
Curva de la bañera, 86, 112, 179, 180, 195, 196, 197, 202, 304

D

Davies, 28, 86, 87, 112, 149, 177
debugging, 86
demanda, 188, 258, 259
Desgaste, 52, 84, 112, 130
desviación estándar, 191
Disponibilidad, 17, 30, 31, 32, 33, 35, 39, 41, 42, 43, 49, 50, 56, 57, 58, 60, 63, 67, 68, 70, 71, 73, 75, 77, 78, 84, 85, 89, 90, 91, 95, 106, 116, 125, 133, 149, 165, 176, 180, 181, 185, 195, 206, 210, 214, 215, 216, 241, 256, 263, 266, 303, 305, 308, 322, 324, 326
Distribución LogNormal, 134, 136, 139
Distribución Normal, 129, 131, 132, 133, 134

E

estacional, 187
Estrategia, 28, 29, 33, 35, 37, 43, 179, 180, 202, 203, 204, 205, 214, 217, 219, 221, 222, 249, 261, 283, 303, 312, 321, 327
Exponencial, 138, 140, 141

F

fallas, 18, 26, 28, 29, 30, 31, 38, 40, 47, 50, 53, 55, 56, 57, 58, 60, 67, 68, 70, 79, 81, 83, 84, 86, 87, 92, 95, 107, 113, 114, 116, 120, 122, 125, 130, 131, 132, 136, 141, 158, 173, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 185, 202, 203, 205, 234
Fallas, 29, 30, 56, 70, 79, 86, 113, 122, 126, 131, 132, 133, 135, 136, 138, 140, 141, 142, 148, 149, 160, 179, 180, 182, 202, 229, 234, 236, 237, 248, 249, 251
Función Macroeconómica de la Producción, 206

G

Gamma, 91, 112, 126, 138, 140, 141, 142, 147, 148, 227

H

hipótesis, 187, 188
Hronec, 29, 39, 222, 223, 228

I

inherente, 30, 70, 89, 90, 91, 95, 116, 133, 162
inventario, 257, 258, 260
inventarios, 29, 30, 33, 39, 55, 188, 189, 202, 205, 214, 224, 256, 257, 258, 260, 261, 263, 266, 267, 269, 270, 271, 272, 276, 353, 354

K

Kaizen, 217, 220

L

LogNormal, 154

M

mantenibilidad, 85, 106, 112, 120, 122, 124, 125, 129, 130, 131, 134, 135, 136, 140, 148, 162, 173, 174, 180, 181, 185, 202, 229
Mantenibilidad, 72, 194, 303, 304, 308
Mantenimiento, 16, 17, 18, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 68, 71, 73, 74, 78, 79, 84, 85, 86, 87, 88, 90, 94, 111, 119, 158, 162, 173, 174, 176, 178, 179, 180, 181, 185, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 220, 222, 256, 279
media, 191
medias móviles, 187
MUP, 188

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

N

nivel, 259, 260
normal, 187, 188
Normal, 26, 28, 39, 84, 129, 130, 134, 135, 148, 174, 176, 177, 178, 179, 181

O

OIT, 19
Operacional Generalizada, 68, 75, 76

P

patrón, 188, 191
PMO, 28, 31
Proactiva, 55, 56, 72, 203, 239, 299, 303, 313, 314, 315, 316, 318, 321, 322
Producción, 16, 17, 18, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 55, 56, 57, 58, 60, 78, 79, 85, 86, 94, 156, 157, 158, 159, 176, 178, 179, 180, 181, 195, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 208, 209, 210, 212, 213, 214, 215, 217, 218, 220, 221, 222, 224, 226, 227, 234, 235, 236, 238, 240, 247, 249, 257, 277, 279, 280, 281, 297, 298, 299, 300, 304, 305, 306, 307, 308, 312, 318, 320, 322, 324, 325
Productividad, 17, 28, 207, 208, 209
pronósticos, 188, 189, 190, 191, 257, 353, 354
Pronósticos, 188, 189, 190
prospectiva, 188, 353
proyectiva, 187, 188
pull, 263, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276
push, 263, 266, 267, 324

R

RCM, 28, 29, 31, 38, 53, 55, 56, 71, 178, 179, 180, 181, 182, 185, 201, 202, 203, 205, 222, 234, 235, 239, 253, 303, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 315, 318, 319, 322
reactivo, 203
Reactivo, 28, 31, 53, 318
Reparaciones, 28, 30, 31, 40, 55, 56, 58, 60, 67, 68, 70, 71, 72, 73, 81, 84, 85, 86, 90, 91, 92, 95, 104, 107, 113, 126, 131, 135, 148, 174, 176, 178, 179, 180, 181, 182, 185, 202, 203, 204, 211, 212, 213, 214, 222, 224, 287, 297, 298, 300, 301, 303, 304, 308, 323, 324, 326
residuos, 191
ruido, 189, 191

S

serie temporal, 187, 188, 190
series temporales, 186, 187, 188, 191
suavización, 189, 191

T

Táctica, 27, 28, 35, 37, 53, 78, 178, 179, 180, 182, 201, 202, 204, 205, 217, 219, 221, 222, 224, 303, 304, 306, 307, 309, 312, 313, 314, 315, 316, 318, 319, 320, 321, 322
Tareas proactivas, 71, 72, 77, 178, 179, 180, 181, 182, 185, 203, 212, 214, 215, 222, 234, 236, 255, 298, 301, 302, 316, 323, 324
Terotecnología, 28, 32, 33, 40
TPM, 27, 28, 31, 32, 53, 55, 56, 178, 180, 201, 202, 203, 205, 217, 234, 239, 303, 305, 306, 307, 311, 312, 313, 315, 318, 319, 322
transición, 186, 188, 353

U

universal, 188

V

variables, 188, 191
ventas, 188

W

Weibull, 60, 81, 84, 89, 91, 94, 104, 107, 111, 112, 113, 114, 116, 119, 122, 125, 126, 129, 130, 133, 134, 138, 140, 141, 148, 149, 150, 154, 166, 195, 196, 215, 216, 227

B

βeta, 40, 60, 84, 86, 87, 91, 107, 112, 113, 116, 125, 126, 129, 130, 133, 138, 140, 148, 150, 176, 179, 181, 185, 195, 234, 304, 324

Editado por
COLDI
EDITADA

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Curriculum Vitae

Alberto Mora Gutiérrez

Títulos obtenidos:

- Ingeniero en Ciencias Mecánicas – Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín – Colombia
- Diplomatura - Experticia en Alta Gerencia – INCE – Puerto Ordaz – Venezuela
- Diplomatura - Experticia en Electrónica – INCE - Valencia – Venezuela
- Estudios de Maestría iniciados en Administración de Negocios – Universidad Carabobo – Valencia – Venezuela
- Magister en Administración de Empresas – Universidad EAFIT – Medellín – Colombia
- Especialización en Mercadeo – Universidad EAFIT – Medellín – Colombia
- Especialización en Gestión Empresarial – Universidad Politécnica de Valencia – Valencia – España
- Suficiencia Investigadora Doctoral - Universidad Politécnica de Valencia - España
- Ph.D. - Doctorado en Ingeniería Industrial – Énfasis y Tesis Cum Laude en Prospectiva, Logística e Ingeniería Mantenimiento – Universidad Politécnica de Valencia – Valencia – España

Experiencia Laboral:

- Industrias Alimenticias NOEL - Galletas, dulces, alimentos y conservas - Medellín – Colombia – Jefe Mantenimiento Seccional
- Industrias Alimenticias Lara Carabobo - INLACA - Lácteos, jugos y conservas – Valencia – Venezuela - Subdirector nacional de Ingeniería de Mantenimiento y Proyectos
- Pasteurizadora Guayana - INLACA - Lácteos, quesos, jugos, bebidas y conservas – Ciudad Bolívar – Venezuela – Gerente General
- Industrias Alimenticias del Yocoima - INLAYOSA hoy Parmalat - Jugos, lácteos, quesos y afines - Upata - Estado Bolívar - Venezuela - Gerente General
- Gaseosas Postobón, Lux y Pepsi-Cola - Alimentos, bebidas y gaseosas - Barranquilla – Colombia - Gerente General.
- Lloreda Grasas - División Plásticos – Cali y Barranquilla – Colombia – Gerente de División
- ADM Limitada - Alimentos y plásticos - Medellín - Colombia – Gerente General
- COLDI Limitada - Gestora y Operadora internacional de Mantenimiento & Pronósticos – Medellín – Colombia - Gerente General
- Universidad EAFIT - Medellín - Colombia - Profesor, Jefe de la Carrera y el Departamento de Ingeniería Mecánica, Jefe de PET (Prácticas Profesionales). Coordinador de la Especialización en Mantenimiento Industrial, Director del Grupo GEMI - Grupo de Estudios e Investigación en Mantenimiento Industrial. Profesor Investigador en pregrado y postgrado. Asesor y Consultor Empresarial.
- COLMASU SA - Empresa Multinacional Andina - Asesorías en Mantenimiento Industrial, Inventarios, Pronósticos y Gestión Empresarial - Guayaquil – Ecuador – Presidente
- Director Técnico y Facilitador Proyectos Mayores – Compañía Logística de Inventarios, Pronósticos e Ingeniería de Mantenimiento y de Fábricas - COLDI Ltda.

Algunas experiencias relevantes del autor en mantenimiento, producción, pronósticos, inventarios, estudios de manejo de materiales, producción y repuestos:

- ABRACOL - Colombia
- ACIEM – Colombia
- ACIEM Atlántico - Colombia
- ACOLTEX - Colombia
- AEROLÍNEAS ACES - Colombia
- ALICO - Colombia
- ARCLAD S. A. - Colombia
- ARRENDAMIENTOS EL TRÉBOL – Colombia
- AYURÁ MOTORS – Colombia
- BAVARIA – SAB MILLER – Colombia y ecuador
- C.C.N. Grupo Bavaria SAB Miller Ecuador
- CAMACOL - Colombia
- CAMPAÑA GOBERNADOR DEPARTAMENTO ATLÁNTICO PROSPECTIVO EDUARDO VERANO – Barranquilla Colombia
- CANTTEL S.A. - Colombia
- CEMEX – Colombia
- CENSA – Centrales Eléctricas – Cúcuta – Colombia
- CERREJÓN – Colombia
- C.I. AGRÍCOLAS UNIDAS - Colombia
- CICE – Quito – Ecuador
- CLAPAM – Ecuador
- CLÍNICA IMBANACO – Colombia
- COCIER - Colombia
- COHAN – Colombia
- COLCERÁMICA S. A. – GS1 – Colombia
- Colchones SPRING S.A. – Bogotá - Colombia
- COLMASU S.A. Ecuador MINEROS DE ANTIOQUIA - Colombia
- COLTABACO S.A. – Colombia
- COMERCIALIZACIÓN & MERCADEO – Bogotá Colombia
- COMUNIDAD EUROPEA – España
- CONFECOOP - Colombia
- CORELCA S.A. E.S.P. – Colombia
- CRYOGAS – Colombia
- DELOITTE & TOUCHE - ECOPETROL - OXY - Colombia
- DELOITTE AND TOUCHE - Colombia
- ECOPETROL - Colombia
- EDUARDOÑO - Colombia
- EEPPM - Colombia
- EMMA – IMUSA – Colombia
- EMPRESA ENERGÍA BOGOTÁ – Colombia
- ENERSAFE S.A. - Colombia
- FABRICATO – Colombia
- FERIA DE GANADOS DE MEDELLÍN – Colombia
- FFAAC – IAC – Colombia
- FENAVI – Avícola - Colombia
- Fuerzas Armadas Navales – Ecuador
- Fuerza Naval ARC – Colombia
- Fuerza Aérea - Colombia
- FFAAE - Guayaquil - Ecuador
- FUNCICE - Ecuador
- Grupo COLCERÁMICA Colombia
- Grupo Empresarial GAMMA – La Habana – Cuba
- GRUPO CRYSTAL - TINTORERÍA CRYSTAL S.A. - Colombia
- GRUPO HACEB - Colombia
- GS1 Guatemala - Honduras - Santo Domingo
- HOSPITAL FEDERICO LLERAS ACOSTA - Colombia
- HOSPITAL PABLO TOBÓN URIBE - Colombia
- IAC GS1 - Colombia
- INCAMETAL S.A. – Colombia
- Ingeniería Especializada Blandón – IEB - Sector Eléctrico - Colombia
- INTERSERVICIOS C.T.A. – Colombia
- INTEGRAL S.A. & U. EAFIT - Colombia
- IPCE - Colombia
- ISA S.A. E.S.P. – LCM – Colombia
- ISA - Colombia
- ISAGÉN – Colombia
- LABORATORIOS BITAR – Colombia
- LAUMAYER INTERNACIONAL
- LCM - CONSULTORES ASOCIADOS S.A.- Colombia
- LECHE CARABOBO – Venezuela
- LECHE INLAYOSA – PARMALAT - Venezuela
- LEMAHN BROTHERS – USA
- LUKER S.A. & U. EAFIT - Colombia
- LLOREDA GRASAS S.A. – Colombia
- LONJA DE PROPIEDAD RAÍZ DE MEDELLÍN – Colombia
- MASA – Colombia
- MIND DE COLOMBIA – Software Forecast Pro XE - Colombia
- MUNICIPIO LA ESTRELLA - Colombia
- MUNICIPIO RIONEGRO - Colombia
- NACIONAL DE CHOCOLATES – Colombia
- NESTLÉ - Ecuador
- NOEL - Colombia
- NEW STETIC – Colombia
- OXY - Colombia
- PARTIDO CONSERVADOR - Colombia
- PARTIDO LIBERAL – Dpto. Atlántico - Colombia
- PASTELITOS S.A. - Colombia
- PASTEURIZADORA GUAYANA - Venezuela
- PELDAR S.A. - OWENS ILLINOIS - Colombia
- POSTOBÓN S.A. - Colombia
- PREMAC - Colombia
- PRODUCTOS FAMILIA SANCELA S.A. – Colombia
- PUBLICAR S.A. – Medellín – Colombia
- Servicios Empresariales - SESO – Ecuador
- SESO – Cuba
- Grupo Industrial Vidrio Cemento - Cuba
- SIEMENS S.A. – Bogotá – Colombia
- SOCIEDAD PORTUARIA REGIONAL CARTAGENA - Colombia
- SOFASA – RENAULT – TOYOTA - Colombia
- SOLLA S.A. - Colombia
- SURENTING - Colombia
- TRANSELCA S.A. E.S.P. – Colombia
- UNE - Electricidad Generación - Cuba
- UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - Colombia
- UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN – Colombia
- UNIVERSIDAD RICARDO PALMA – Perú
- UNIVERSIDAD DEL VALLE DE MÉXICO – México

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES – Colombia
- UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CALI – Colombia
- UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA - Colombia
- UNIVERSIDAD DE CARABOBO – Venezuela
- UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA - Venezuela
- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA- España
- UNIVERSIDAD FEDERICO SANTAMARÍA – Chile
- UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER – Colombia
- UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR – Colombia
- UNIVERSIDAD DE IBAGUÉ - Colombia
- V-FACTORY INC – Colombia
- WIN SOFTWARE Y ASOCIADOS – Colombia

Otros:
Asesor, consultor, facilitador, desarrollador, conferencista, profesor universitario, etc. en prospectiva, pronósticos, inventarios, métodos futurísticos, inteligencia de mercados, estadística, gestión empresarial y mantenimiento industrial - En países como Colombia, Venezuela, Perú, Ecuador, Chile, México, Costa Rica, Honduras, República Dominicana, Panamá, Guatemala, Nicaragua, Puerto Rico, España, Estados Unidos. Escritor de los Libros Mantenimiento Estratégico para empresas industriales o de servicios, Mantenimiento estratégico empresarial, Pronósticos de demanda e Inventarios, Mantenimiento industrial, etc.

Contacto con el Autor:

Teléfonos 57 4 3361605 - 57 4 2619349 - Celular 312 2874586 - Fax 57 4 3361364
Email coldi@une.net.co - coldiltda@mail.com - www.coldiltda.com **- Apartado Aéreo 080444 - Envigado - Antioquia - Colombia**

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Novedades y Estructura de la Obra Mantenimiento Industrial Efectivo

El libro presenta una novedosa y efectiva metodología para manejar con éxito todas las actividades, estrategias y acciones propias del mantenimiento industrial, enmarcada en un nuevo enfoque sistémico kantiano que permite entender, manejar y controlar un sistema de mantenimiento y producción, bajo los más modernos y rigurosos conceptos científicos y prácticos encontrados a través de muchos años de experiencia y estudio del autor, en varios continentes.

Está diseñado de tal manera que todos los conceptos se manejan con el más puro tratamiento científico, con aplicaciones fáciles de entender y de llevar a cabo en las empresas.

La estructura del libro se desarrolla en dos partes:

- La primera es de fundamentación, niveles, conceptos y reglas entre los elementos fundamentales de mantenimiento; esto incluye los capítulos 1 al 4.
- La segunda parte consta de los cuatro niveles de mantenimiento, así:
  - Nivel instrumental, del capítulo 5.
  - Niveles operacional, táctico y estratégico en el capítulo 6.

La aplicación de conceptos relevantes sobre la medición real de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad se desarrolla de una forma seria y sencilla de entender que permite su aplicación en las empresas, se muestran los cálculos correctos que se deben realizar y sobre todo se describe su interpretación de tal manera que se puedan tomar acciones estratégicas que permitan su mejoramiento continuo.

Uno de los principales aportes consiste en definir las pautas para entender el mantenimiento como un sistema que posee niveles diferenciales con todos sus elementos, que tiene un lenguaje propio y específico, el cual permite una fácil comunicación entre los actores relevantes: mantenimiento, producción y máquinas.

La concepción integral y detallada del mantenimiento es un aporte relevante en este libro, ya que permite el manejo y el dominio rápido de todos los conceptos y las relaciones de unos con otros, destaca a su vez la necesidad de enfocar el mantenimiento en forma simultánea desde los cuatro niveles (instrumental, operativo, táctico y estratégico), en especial definiendo los niveles superiores de CMD, *LCC* y costos con el fin de determinar los niveles inferiores que se manejan de abajo hacia arriba (desde las herramientas hasta encontrar la táctica más ajustada a las necesidades particulares de las empresas de servicios o empresariales).

Se recalca la importancia de medir y controlar de una forma planeada todos los niveles y las acciones de mantenimiento en forma simultánea, de abajo hacia arriba (que es lo normal en las empresas) y de forma inversa que es lo novedoso de este libro.

Es muy útil para llevar a la realidad los conceptos internacionales de mantenimiento, dada la diversidad de casos que se presentan, las ayudas en Excel, los programas informáticos y los ejercicios que se plantean; tanto en el libro como en el CD adjunto.

Curriculum Vitae Autor Alberto Mora Gutiérrez

Títulos obtenidos:

- Ingeniero en Ciencias Mecánicas – Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín – Colombia
- Diplomatura - Experticia en Alta Gerencia – INCE – Puerto Ordaz – Venezuela
- Diplomatura - Experticia en Electrónica – INCE - Valencia – Venezuela
- Estudios de Maestría iniciados en Administración de Negocios – Universidad Carabobo – Valencia – Venezuela
- Magister en Administración de Empresas – Universidad EAFIT – Medellín – Colombia
- Especialización en Mercadeo – Universidad EAFIT – Medellín – Colombia
- Especialización en Gestión Empresarial – Universidad Politécnica de Valencia – Valencia – España
- Suficiencia Investigadora Doctoral - Universidad Politécnica de Valencia - España
- Ph.D. - Doctorado en Ingeniería Industrial – Énfasis y Tesis Cum Laude en Prospectiva, Logística e Ingeniería Mantenimiento – Universidad Politécnica de Valencia – Valencia – España

Experiencia Laboral:

- Industrias Alimenticias NOEL - Galletas, dulces, alimentos y conservas - Medellín – Colombia – Jefe Mantenimiento Seccional
- Industrias Alimenticias Lara Carabobo - INLACA - Lácteos, jugos y conservas – Valencia – Venezuela - Subdirector nacional de Ingeniería de Mantenimiento y Proyectos
- Pasteurizadora Guayana - INLACA - Lácteos, quesos, jugos, bebidas y conservas – Ciudad Bolívar – Venezuela – Gerente General
- Industrias Alimenticias del Yocoima - INLAYOSA hoy Parmalat - Jugos, lácteos, quesos y afines - Upata - Estado Bolívar - Venezuela - Gerente General
- Gaseosas Postobón, Lux y Pepsi-Cola - Alimentos, bebidas y gaseosas - Barranquilla – Colombia - Gerente General.
- Lloreda Grasas - División Plásticos – Cali y Barranquilla – Colombia – Gerente de División
- ADM Limitada - Alimentos y plásticos - Medellín - Colombia – Gerente General
- COLDI Limitada - Gestora y Operadora internacional de Mantenimiento & Pronósticos – Medellín – Colombia - Gerente General
- Universidad EAFIT - Medellín - Colombia - Profesor, Jefe de la Carrera y el Departamento de Ingeniería Mecánica, Jefe de PET (Prácticas Profesionales). Coordinador de la Especialización en Mantenimiento Industrial, Director del Grupo GEMI - Grupo de Estudios e Investigación en Mantenimiento Industrial. Profesor Investigador en pregrado y postgrado. Asesor y Consultor Empresarial.
- COLMASU SA - Empresa Multinacional Andina - Asesorías en Mantenimiento Industrial, Inventarios, Pronósticos y Gestión Empresarial - Guayaquil – Ecuador – Presidente
- Director Técnico y Facilitador Proyectos Mayores – Compañía Logística de Inventarios, Pronósticos e Ingeniería de Mantenimiento y de Fábricas - COLDI Ltda.

Algunas experiencias relevantes del autor en mantenimiento, producción, pronósticos, inventarios, estudios de manejo de materiales, producción y repuestos:

ABRACOL - Colombia
ACIEM - Colombia
ACIEM Atlántico - Colombia
ACOLTEX - Colombia
AEROLINEAS ACES - Colombia
ALICO - Colombia
ARCLAD S. A. - Colombia
ARRENDAMIENTOS EL TRÉBOL – Colombia
AVURA MOTORS – Colombia
BAVARIA – SAB MILLER – Colombia y ecuador
C.C.N. Grupo Bavaria SAB Miller Ecuador
CAMACOL - Colombia
CAMPAÑA GOBERNADOR DEPARTAMENTO
ATLÁNTICO PROSPECTIVO
EDUARDO VERANO – Barranquilla Colombia
CANTEL S.A. - Colombia
CEMEX – Colombia
CENSA – Centrales Eléctricas – Cúcuta - Colombia
CERREJÓN - Colombia
C.I. AGRÍCOLAS UNIDAS - Colombia
CICE – Quito – Ecuador
CLAPAM – Ecuador
CLÍNICA IMBANACO – Colombia
COCIER - Colombia
COHÁN – Colombia
COLCERÁMICA S. A. – GSI – Colombia
Colchones SPRING S.A. – Bogotá - Colombia
COLMASU S.A. Ecuador
MINEROS DE ANTIOQUIA - Colombia
COLTABACO S.A. – Colombia
COMERCIALIZACIÓN & MERCADEO – Bogotá Colombia
COMUNIDAD EUROPEA – España
CONFECOOP - Colombia
CORELCA S.A. E.S.P. – Colombia
CRYOGAS – Colombia
DELOITTE & TOUCHE - Colombia
ECOPETROL - OXY - Colombia
DELOITTE AND TOUCHE - Colombia
ECOPETROL - Colombia
EDUARDONO - Colombia
EEPPM - Colombia
EMMA – IMUSA – Colombia
EMPRESA ENERGÍA BOGOTÁ – Colombia
ENERSAFE S.A. - Colombia
FABRICATO – Colombia
FERIA DE GANADOS DE MEDELLÍN – Colombia
FFAAC – IAC – Colombia
FENAVI – Avícola - Colombia
Fuerzas Armadas Navales – Ecuador
Fuerza Naval ARC – Colombia
Fuerza Aérea - Colombia
FFAAE - Guayaquil - Ecuador
FUNCICE - Ecuador
Grupo COLCERÁMICA Colombia
Grupo Empresarial GAMMA – La Habana – Cuba
GRUPO CRYSTAL - TINTORERÍA CRYSTAL S.A. - Colombia
GRUPO HACEB - Colombia
GSI Guatemala - Honduras - Santo Domingo
HOSPITAL FEDERICO LLERAS ACOSTA - Colombia
HOSPITAL PABLO TOBÓN URIBE - Colombia
IAC GSI - Colombia
INCAMETAL S.A. - Colombia
Ingeniería Especializada Blandón – IEB - Sector Eléctrico - Colombia
INTERSERVICIOS C.T.A. – Colombia
INTEGRAL S.A. & U. EAFIT - Colombia
IPCE - Colombia
ISA S.A. E.S.P. – LCM – Colombia
ISA - Colombia
ISAGEN – Colombia
LABORATORIOS BITAR – Colombia
LAUMAYER INTERNACIONAL
LCM - CONSULTORES ASOCIADOS S.A.- Colombia
LECHE CARABOBO – Venezuela
LECHE INLAYOSA – PARMALAT - Venezuela
LEMAIN BROTHERS - USA
LUKER S.A. & U. EAFIT - Colombia
LLOREDA GRASAS S.A. – Colombia
LONJA DE PROPIEDAD RAÍZ DE MEDELLÍN – Colombia
MASA – Colombia
MIND DE COLOMBIA – Software Forecast Pro XE - Colombia
MUNICIPIO LA ESTRELLA - Colombia
MUNICIPIO RIONEGRO - Colombia
NACIONAL DE CHOCOLATES – Colombia
NESTLÉ - Ecuador
NOEL - Colombia
NEW STETIC – Colombia
OXY - Colombia
PARTIDO CONSERVADOR - Colombia
PARTIDO LIBERAL – Dpto. Atlántico - Colombia
PASTELITOS S.A. - Colombia
PASTEURIZADORA GUAYANA - Venezuela
PELDAR S.A. - OWENS ILLINOIS - Colombia
POSTOBÓN S.A. - Colombia
PREMAC - Colombia
PRODUCTOS FAMILIA SANCELA S.A. - Colombia
PUBLICAR S.A. – Medellín – Colombia
Servicios Empresariales - SESO – Ecuador
SESO - Cuba
Grupo Industrial Vidrio Cemento - Cuba
SIEMENS S.A. – Bogotá – Colombia
SOCIEDAD PORTUARIA REGIONAL CARTAGENA - Colombia
SOFASA – RENAULT – TOYOTA - Colombia
SÓLLAS A.A. - Colombia
SURENTING - Colombia
TRANSELCA S.A. E.S.P. – Colombia
UNE - Electricidad Generación - Cuba
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA - Colombia
UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN – Colombia
UNIVERSIDAD RICARDO PALMA - Perú
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE MÉXICO - Mexico
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES – Colombia
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CALI – Colombia
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA - Colombia
UNIVERSIDAD DE CARABOBO – Venezuela
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA - Venezuela
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA - España
UNIVERSIDAD FEDERICO SANTAMARÍA – Chile
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER – Colombia
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR – Colombia
UNIVERSIDAD DE IBAGUÉ - Colombia
V-FACTORY INC. – Colombia
WIN SOFTWARE Y ASOCIADOS – Colombia

Otras actividades del Autor:

Asesor, consultor, facilitador, desarrollador, conferencista, profesor universitario, etc. en prospectiva, pronósticos, inventarios, métodos futurísticos, inteligencia de mercados, estadística, gestión empresarial y mantenimiento industrial - En países como Colombia, Venezuela, Perú, Ecuador, Chile, México, Costa Rica, Honduras, República Dominicana, Panamá, Guatemala, Nicaragua, Puerto Rico, España, Estados Unidos. Escritor de los Libros Mantenimiento Estratégico para empresas industriales o de servicios, Mantenimiento estratégico empresarial, Pronósticos de demanda e Inventarios, Mantenimiento Industrial, etc.

Contacto con el Autor:

Teléfonos 57 4 3361605 - 57 4 2619349 - Celular 312 2874586 - Fax 57 4 3361364
Emails coldi@une.net.co - coldiltda@mail.com
Página web www.coldiltda.com
Apartado Aéreo 080444 - Envigado - Antioquia - Colombia

Editado por COLDI LIMITADA

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com