

MANUAL
DE
INDICADORES
DE
MANTENIMIENTO

INDICE

	Paginas.
Sumario	03
Introducción	04
Definiciones	05
Premisas	07
Indicadores Estandarizados	08
Otros Indicadores	11
Desarrollo Teórico de los indicadores	12
1.-Índices de seguridad	12
2.-Indicadores de rendimiento	14
3.-Índices de costes de mantenimiento	16
4.-Indicadores de efectividad	18
Resumen de Indicadores	36
1.-Efectividad	36
2.-Rendimiento	40
3.-Costes	42
4.-Seguridad	44
Conclusiones	46
Referencias	47
Anexos	48

SUMARIO

El propósito de este Documento Técnico es el de suministrar un grupo de indicadores estandarizados para medir la gestión de la función Mantenimiento, con la finalidad de hablar un mismo lenguaje sobre la manera de medir dicha gestión en la empresa.

Estos indicadores son los utilizados por las empresas líderes a nivel mundial, de manera de seleccionar indicadores que redujeran los costes de gestión, permitir efectuar estudios de comparación competitiva (Benchmarking) y determinar una clara relación entre el indicador y la producción a fin de identificar oportunidades de mejora.

I.- INTRODUCCION

Los indicadores de Mantenimiento utilizados hasta la fecha han cumplido su función, permitiendo medir la gestión y dar una indicación de cómo se comportaba el proceso de mantenimiento en la empresa.

II.- DEFINICIONES

-  **FALLA:** la terminación de la capacidad de un equipo para realizar una función requerida.
-  **TIEMPO DE FALLA:** es el tiempo que transcurre desde que la unidad esta fuera de servicio por una falla.
-  **TIEMPO DE REPARACION:** Se considerara igual al tiempo de falla.
-  **MANTENIMIENTO:** es el conjunto de actividades y procesos estratégicos realizados para conservar y/o restablecer infraestructuras, sistemas, equipos y dispositivos (ISED) a una condición que les permita cumplir con las funciones requeridas dentro de un marco económico óptimo y de acuerdo a las normas técnicas y procedimientos de seguridad establecidos.
-  **MANTENIMIENTO CORRECTIVO:** es el mantenimiento que se ejecuta después de la aparición de una falla para restablecer un ISED a una condición en la cual pueda cumplir la función requerida.
-  **MANTENIMIENTO PREVENTIVO:** es el mantenimiento que se ejecuta a intervalos predeterminados y/o de acuerdo a criterios prescritos, utilizando todos los medios disponibles, para determinar frecuencia de inspecciones, revisiones, sustitución de piezas, probabilidad de aparición de fallas, vida útil, etc., con el objeto de reducir, predecir y/o prevenir fallas, o detectarlas en su fase incipiente, evitando así la degradación o deterioro del ISED y sus consecuencias negativas para el proceso productivo.
-  **MANTENIMIENTO MAYOR:** es el mantenimiento preventivo y/o correctivo que se ejecuta a una o varias instalaciones y/o sistemas para restablecer y/o conservar sus condiciones operacionales y para ejecutar dicho mantenimiento se requiere parar la producción de las instalaciones y/o sistemas.
-  **PROYECTO DE MANTENIMIENTO:** son las actividades de todo tipo encaminadas a tratar de eliminar la necesidad de mantenimiento, corrigiendo la causa raíz de la falla de manera integral. Las acciones más comunes que realiza

son: modificaciones de elementos de máquinas, modificaciones de alternativas de proceso, cambios de especificaciones, ampliaciones, revisión de elementos básicos de mantenimiento y conservación, mediante la elaboración de un proyecto.

III.-PREMISAS

-  Los indicadores a seleccionar deben cumplir estándares internacionales que permitan hacer benchmarking.
-  Se seleccionaran el mínimo número de indicadores que permitirán medir la gestión y su impacto en producción, haciendo posible detectar oportunidades de mejora. Los mismos se agruparán en cuatro grandes áreas de la gestión:
 1. Efectividad
 2. Rendimiento
 3. Costes
 4. Seguridad
-  Los indicadores que se seleccionen pueden ser utilizados para equipos y sistemas. Para usarlos en sistemas, la fórmula de cálculo debe ser desarrollada por los equipos naturales de trabajo, aplicando un software de simulación una vez que el grupo natural de trabajo defina el sistema.
-  En la medida de lo posible los nuevos indicadores deberían utilizar la data primaria histórica almacenada en los sistemas de información existentes, de modo que a partir de dicha data se pudiese calcular los nuevos indicadores estandarizados.

VI.-INDICADORES ESTANDARIZADOS

Para poder determinar la situación de la función de mantenimiento, se seleccionan un número determinado de indicadores en cuatro áreas de la gestión. Todos ellos en conjunto pueden indicar cual es la situación de la gestión de mantenimiento, y a su vez dar a conocer como es su desenvolvimiento en el tiempo.

Las cuatro áreas seleccionadas:

- Efectividad
- Rendimiento
- Coste
- Seguridad

A continuación se detalla cada una de esas áreas y los indicadores seleccionados para cada una de ellas.

EFFECTIVIDAD:

Los indicadores asociados a esta área permiten ver el comportamiento operacional de las instalaciones, sistemas, equipos y dispositivos, además mide la calidad de los trabajos y el grado de cumplimiento de los planes de mantenimiento.

Los indicadores asociados a esta área son:

-  Tiempo Promedio para Fallar (TPPF)
-  Tiempo Promedio para Reparar (TPPR)
-  Disponibilidad (D) (*)
-  Utilización (U)
-  Confiabilidad (C)

(*) Adicionalmente a este indicador, se incluye otro llamado Disponibilidad Operacional que se explica en el Capítulo V y en el Anexo No. 2.

Este grupo de cinco indicadores antes mencionados están asociados al comportamiento de las instalaciones, sistemas, equipos y dispositivos. Ellos serán explicados y desarrollados en el Capítulo VI.

-  Recomendaciones Técnicas Pendientes
-  BACKLOG
-  Desviación de la Planificación
-  Cumplimiento del Mantenimiento Preventivo
-  Índice de Rechazo Unidades Reparadas
-  Índice de Trabajos por Prioridad.

Este último grupo de seis indicadores antes mencionados están asociados a medir la calidad de los trabajos y el grado de cumplimiento de los planes de mantenimiento. Sus formulas de cálculo se explican en el (Capítulo VI).

RENDIMIENTO:

Esta área esta relacionada a la gestión del Recurso Humano asociada al mantenimiento, los mismos son:

-  Índice de Ausentismo
-  Índice de Sobre-tiempo
-  Índice de Fuerza Hombre Contratada
-  Cumplimiento Plan de Adiestramiento
-  Índice de Personal Adiestrado

Estos indicadores son genéricos, pudiéndose utilizar para otras funciones diferentes a mantenimiento. Sus fórmulas de cálculo se explican en el (Capítulo VI).

COSTES:

Esta área mide los gastos asociados a la gestión de mantenimiento, como son distribuidos los mismos y si están orientados a mejorar la eficiencia de la empresa.

Coste de Mantenimiento por Unidad de Producción

-  Costo de Mantenimiento por Hora Hombre
-  Relación de Costo Mantenimiento Vs Producción.
-  Índice Costo de Mantenimiento Preventivo
-  Índice Costo de Mantenimiento Correctivo

Existen otros indicadores de costes que los provee los sistemas de información como (SAP-, Maximo) en su estándar y pueden ser utilizados por el cliente, según sus necesidades.

SEGURIDAD:

Estos indicadores determinan los aspectos de trabajo seguro en la función de mantenimiento.

-  Índice de Frecuencia Bruta
-  Índice de Frecuencia Neta
-  Índice de Severidad

Estos indicadores no son exclusivos de la función mantenimiento, pudiéndose utilizar en otras funciones. Sus fórmulas de cálculo se explican en el (Capítulo VI).

V.-OTROS INDICADORES ESTANDARIZADOS.

-  Efectividad total de equipo (ETE).
-  Capacidad Efectiva (CE)
-  Disponibilidad Operacional (DO)
-  Indicadores Financieros
 - ❖ Valor Económico Agregado (VEA).
 - ❖ Tasa de retorno del capital empleado (ROCE)

El uso y cálculo de estos indicadores debe estar sujeto a un análisis de los equipos de planificación de la empresa, estos indicadores serán calculados a un nivel macro de la gestión; en especial los indicadores financieros donde habría que analizar cual es el impacto del mantenimiento en el VEA y el ROCE.

VI.-DESARROLLO TEORICO DE LOS INDICADORES

1.-INDICES DE SEGURIDAD.

INDICES DE SEGURIDAD.

Estos índices reflejan la seguridad, orden y limpieza con que labora el personal de mantenimiento. Están orientados a ver la gestión de mantenimiento en una forma integral en la empresa. Ellos permiten conocer la formación técnica y pericia del personal para ejecutar labores de mantenimiento.

INDICE DE FRECUENCIA BRUTA (IFB)

Es el número de lesiones de trabajos con o sin tiempo perdido ocurridos en un millón de horas hombres de exposición. Entendiéndose como horas de exposición, al número total de horas trabajadas por todos los trabajadores en la nómina considerada.

$$\text{Indice de frecuencia bruta} = \frac{\text{Nº de accidentes totales} \times 1 \text{ MMHH}}{\text{HH Exposición en el período}}$$

INDICE DE FRECUENCIA NETA

Es el número de lesiones de trabajos con tiempo perdido o incapacidades ocurridos en un millón de horas hombres de exposición de todos los trabajadores en la nómina considerada.

$$\text{Indice de frecuencia neta} = \frac{\text{Nº de accidentes con tiempo perdido} \times 1 \text{ MMHH}}{\text{HH Exposición en el período}}$$

INDICE DE SEVERIDAD

Es el total de días cargados por lesiones de trabajo con tiempo perdido o con incapacidad ocurridas en un millón de horas hombres de exposición.

$$\text{Indice de severidad} = \frac{\text{Nº de días totales cargados} \times 1 \text{ MMHH}}{\text{HH Exposición en el periodo}}$$

2.-INDICADORES DE RENDIMIENTO

Estos indicadores están orientados al recurso humano de mantenimiento. En forma general, permite conocer la motivación del personal y refleja sí la cantidad de personal propio en el adecuado para la gestión de mantenimiento.

INDICE DE AUSENTISMO

Mide en forma porcentual las horas ausentes del personal en la ejecución de mantenimiento con relación a las horas totales disponible en el período por causas diferentes a las vacaciones o adiestramiento.

$$\% \text{ Ausentismo Laboral} = \frac{\text{HH ausente (permisos, enfermedad, ausencia injustificada, etc)}}{\text{HH disponible (N° trabajadores x Horas normales del periodo)}} \times 100$$

INDICE DE SOBRETIEMPO.

Mide las horas de sobretiempo laborado por el personal propio en exceso a las horas normales estipuladas. Permite evaluar requerimiento de fuerza hombre, evaluación de programación de trabajo y administración del recurso propio.

$$\% \text{ Sobretiempo} = \frac{\text{HH sobretiempo}}{\text{HH normales disponibles}} \times 100$$

INDICE DE FH CONTRATADA (%FLC)

Mide la proporción de trabajadores contratados que laboran en la organización de mantenimiento. Permite establecer estrategias en la administración de personal. Este indicador guarda estrecha relación con el sobretiempo en el personal propio.

$$\% \text{ FLC} = \frac{\text{HH contratadas}}{\text{HH propia} + \text{HH contratadas}} \times 100$$

CUMPLIMIENTO PLAN DE ADIESTRAMIENTO

Mide el cumplimiento del programa de adiestramiento. El adiestramiento es un elemento de motivación al personal.

$$\% \text{ Cumplim. del adiestram.} = \frac{\text{HH adiestramiento efectuado}}{\text{HH adiestramiento programado}} \times 100$$

INDICE DE PERSONAL ADIESTRADO

Mide el esfuerzo de la organización de mantenimiento para adiestrar a su personal propio.

$$\% \text{ Personal adiestrado} = \frac{\text{HH adiestramiento efectuado}}{\text{HH disponible}} \times 100$$

3.-INDICES DE COSTES DE MANTENIMIENTO.

COSTE DE MANTENIMIENTO POR UNIDAD DE PRODUCCION.

Mide el costo de mantenimiento por unidad de producción en un periodo determinado. Permite visualizar mejoras o deficiencias en el desempeño de las actividades de mantenimiento con relación a la producción.

$$\text{Costo de mantenimiento / Unidad de Producción} = \frac{\text{Costo total de mantenimiento}}{\text{Total de unidades producidas en el periodo}}$$

COSTE DE MANTENIMIENTO POR HH

Relaciona el coste de mantenimiento por unidad de hora-hombre. Permite visualizar mejoras o deficiencias en el rendimiento de la fuerza hombre.

$$\text{Costo de mant/HH.} = \frac{\text{Costo total de mantenim.}}{\text{HH Disponibles de mantenim.}}$$

RELACIÓN DE COSTE MANTENIMIENTO VS. PRODUCCIÓN

Mide la proporción del coste de mantenimiento con relación al coste total de producción.

$$\% \text{ Costo de mant vs. producción.} = \frac{\text{Costo total de mantenim.}}{\text{Costo Total de Producción.}} \times 100$$

INDICE COSTE DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Mide el coste de mantenimiento preventivo con el coste total de mantenimiento. Permite determinar la atención prestada a la prevención de fallas de los ISED.

$$\% \text{ costo mant. prevent.} = \frac{\text{Costo de mant. preventivo}}{\text{Costo total de manten.}} \times 100$$

INDICE COSTE DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Relaciona el coste de mantenimiento correctivo con el coste total de mantenimiento. Permite evaluar la eficiencia de los programas preventivos existentes.

$$\% \text{ costo mant. correct.} = \frac{\text{Costo de correctivo}}{\text{Costo total de mantenim.}} \times 100$$

4.-INDICADORES DE EFECTIVIDAD.

CONFIABILIDAD Y TIEMPO PROMEDIO PARA FALLAR (TPPF).

La confiabilidad es uno de los principales atributos que determinan la efectividad de un equipo o sistema. Se define como la probabilidad de que un equipo o sistema desempeñe satisfactoriamente la función que se requiere de él, bajo condiciones específicas de operación, durante un período de tiempo determinado. De esta definición cabe destacar tres aspectos importantes:

- 📖 La aceptación de la noción probabilística de la confiabilidad.
- 📖 Los problemas relacionados con la definición de ejecución adecuada o satisfactoria, en particular, para parámetros del equipo o sistema que se deterioran lentamente con el tiempo.
- 📖 El criterio requerido para determinar el establecimiento adecuado de las condiciones operativas.

Está claro que se debe definir qué es un funcionamiento adecuado o satisfactorio, o lo que significa el fallo del equipo o sistema, de otra manera, no es posible predecir cuándo fallará en el desempeño de su función requerida. El tiempo que tarda en fallar un equipo o sistema, es decir, su "vida", no se puede determinar precisamente, por lo tanto es una variable aleatoria. Por ello, la confiabilidad se debe cuantificar asignándole una función de probabilidad a la variable aleatoria del tiempo de fallo. Para efectos del cálculo de la confiabilidad se considerará una distribución exponencial de la variable aleatoria del tiempo de fallo. Por lo tanto la confiabilidad será

1

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0$$

Donde,

e ... base del sistema logarítmico natural, $e \cong 2,178$

t ... tiempo considerado o tiempo de la misión

λ ... tasa de fallas (constante para una distribución exponencial), la cual se determina como:

2

$$\text{Tasa de fallas} = \lambda = \text{Cantidad de Fallas} / \text{Cantidad de Horas Operadas}$$

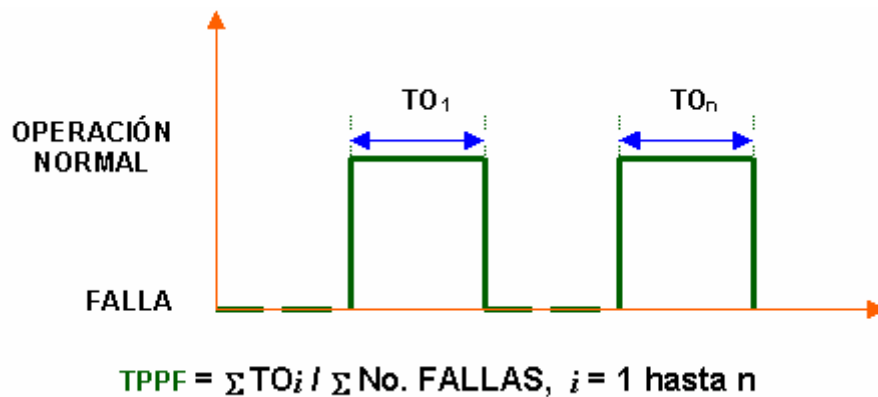
Otra medida que se usa con frecuencia es un indicador indirecto de la confiabilidad del equipo o sistema es el **Tiempo Promedio para Fallar (TPPF)**, que es un valor esperado o medio del tiempo para la variable aleatoria de fallo. Este indicador mide el tiempo promedio que es capaz de operar el equipo a capacidad sin interrupciones dentro del periodo considerado (ver Figura 1), y es el recíproco de la tasa de fallo en una distribución exponencial de la variable aleatoria del tiempo de fallo. El Tiempo Promedio para Fallar se calculará como:

3

$$\text{TPPF} = \theta = 1/\lambda = \text{Cantidad de Horas Operadas} / \text{Cantidad de Fallas}$$

El Tiempo Promedio para Fallar también es llamado "Tiempo Promedio Operativo" o "Tiempo Promedio hasta la Falla".

El problema de usar sólo el TPPF como un indicador de la confiabilidad del equipo es que determina únicamente confiabilidad sólo si el tiempo básico para la distribución de fallo es exponencial. Si la distribución de fallo es de otro tipo, y no exponencial, el TPPF puede generar comparaciones erróneas.



Representación gráfica del Tiempo Promedio para Fallar

Se considera una distribución exponencial debido a su aplicabilidad universal a sistemas reparables. Esta distribución describe los fallos aleatorios; y se utiliza como una herramienta de simplificación en sistemas cuyos múltiples componentes fallan por desgaste y otros modos. El uso de una función exponencial supone asumir una tasa de fallos constante, lo cual no se desvía demasiado de la realidad, al menos por dos razones. Primero, al combinar diferentes funciones de distribución para una variedad de componentes, se produce un patrón aleatorio de fallos. Segundo, la reparación luego del fallo tiende a producir una tasa de fallos constante cuando la población es grande. Se requiere el buen juicio ingenieril del usuario sobre donde y cuando puede ser aplicada esta distribución. Otras distribuciones de vida, sus características y su aplicación en el análisis de confiabilidad se muestran en el Anexo1.

Considerando el Tiempo Promedio para Fallar, la fórmula para calcular la confiabilidad se escribe como sigue:

4

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-(1/\theta)t} = e^{-(t/TPPF)}, \quad t \geq 0$$

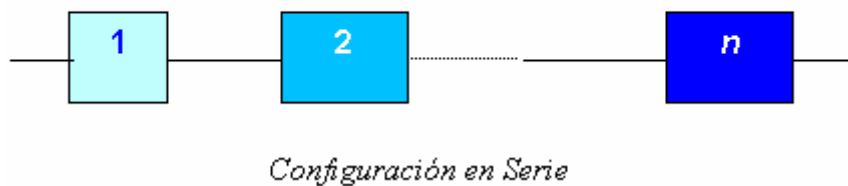
CONFIABILIDAD DE SISTEMAS:

Para analizar y medir las características de confiabilidad y susceptibilidad de mantenimiento de un sistema, se debe contar con un modelo matemático del sistema que muestre las relaciones funcionales entre todos los componentes, los sistemas secundarios y el sistema en su conjunto. La confiabilidad del sistema es una función de las confiabilidades de sus componentes. Un modelo de confiabilidad de sistema consiste en cierta combinación de un diagrama de bloque de confiabilidad o un diagrama causa-efecto, una definición de distribuciones de fallo y reparación de todo el equipo, y un establecimiento de estrategias de reserva y reparación. Todos los análisis y optimizaciones de confiabilidad se hacen basándose en estos modelos matemáticos conceptuales del sistema.

A continuación, se dan algunas relaciones matemáticas entre la confiabilidad del sistema y las confiabilidades de sus componentes. R_s representa la confiabilidad del sistema y R_i la confiabilidad del componente i ésimo, donde $i = 1, 2, \dots, n$ y el sistema tiene n componentes. Además, en las siguientes relaciones, también se supone que todos los elementos trabajan o fallan independientemente unos de otros.

Configuración en serie;

FIGURA N° 2



Expresión ampliada:

5

$$R_S(t) = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t]$$

Si los componentes poseen tasas de fallos idénticas, entonces:

6

$$R_S(t) = \exp(-n\lambda t)$$

Expresión general:

7

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

La tasa de fallas $h_s(t)$ para el sistema está dada por:

8

$$h_s(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t)$$

donde $h_i(t)$ es la tasa de falla del i ésimo componente.

Si todos los componentes tienen un tiempo para fallo exponencialmente distribuido, se tiene.

11

$$R_s(t) = \exp(-\lambda_1 t) + \exp(-\lambda_2 t) - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]$$

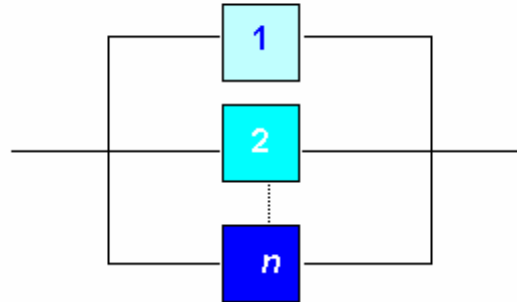
y el TPPF para el sistema está dado por:

10

$$TPPF = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

Configuración en paralelo:

FIGURA N° 3



Configuración en paralelo

Expresión ampliada para el componente activo:

12

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)]$$

Si todos los componentes están activos y el tiempo para fallo de todos ellos está exponencialmente distribuido, entonces el TPPF para el sistema está dado por:

13

$$TPPF = \sum_{i=1}^n \frac{\theta}{i}$$

donde $\theta = \text{TPPF}$ para cada componente.

Expresión ampliada para el componente en reserva (respaldo):

14

$$Rs(t) = [\lambda_2 \exp(-\lambda_1 t) - \lambda_1 \exp(-\lambda_2 t)] / (\lambda_2 - \lambda_1)$$

Si $\lambda = \lambda$ la formula de confiabilidad es indeterminada. Usar

15

$$Rs(t) = \exp(-\lambda t) + \lambda t \exp(-\lambda t).$$

Si $\lambda \approx \lambda$ Usar $\lambda = (\lambda + \lambda)$ Asumir intercambiabilidad perfecta.

Expresión general para n componentes iguales en una configuración de reserva (respaldo) redundante (con intercambiabilidad perfecta):

16

$$Rs(t) = \exp(-\lambda t) \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}$$

Expresión ampliada para el componente activo 2 de 3:

17

$$R_S(t) = 3 \exp(2 - \lambda t) - 2 \exp(3\lambda t)$$

Expresión general para el componente activo m de un sistema con n componentes cuyas confiabilidades son iguales:

18

$$R_S(t) = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \binom{n}{i} R^i (1 - R)^{n-i}$$

o, para el caso de tasa de fallas constante:

19

$$R_S(t) = 1 - \frac{1}{(\lambda t + 1)^n} \sum_{i=0}^{m-1} \binom{n}{i} (\lambda t)^{n-i}$$

Expresión ampliada para el componente en reserva (respaldo) 1 de 3, asumiendo intercambiabilidad perfecta:

$$Rs(t) = \exp(-\lambda t) + \lambda t \exp(-\lambda t) + \frac{1}{2} \lambda^2 t^2 \exp(-\lambda t)$$

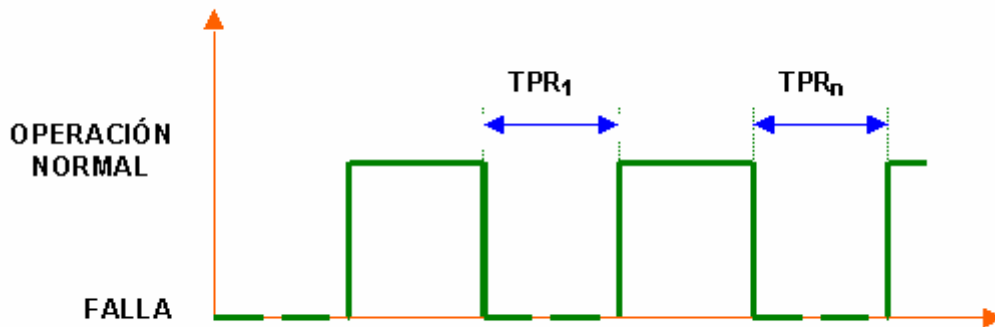
TIEMPO PROMEDIO PARA REPARAR.

El Tiempo Promedio para Reparar (TPPR) es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema. Dicho de otra manera, el TPPR mide la efectividad en restituir la unidad a condiciones óptimas de operación una vez que la unidad se encuentra fuera de servicio por una falla, dentro de un período de tiempo determinado, y considerando al tiempo de fallo igual al tiempo para reparar (ver figura 4).

Si el tiempo de reparación t sigue la distribución exponencial y es mucho menor que el tiempo t de misión, entonces el Tiempo Promedio para Reparar se puede evaluar por medio de:

$$TPPR = \text{Cantidad de horas de falla} / \text{Cantidad de fallas}$$

FIGURA N° 4



$$TPPF = \sum TPR_i / \sum \text{No. FALLAS}, i = 1 \text{ hasta } n$$

Representación gráfica del Tiempo Promedio para Reparar

DISPONIBILIDAD (D).

Se define como la capacidad del equipo o instalación para realizar una función requerida bajo condiciones específicas sobre un periodo de tiempo determinado, asumiendo que los recursos externos requeridos son suministrados. Es un indicador determinístico que traduce los resultados de las acciones de mantenimiento a un índice combinado para un equipo o sistema. Se basa en la pregunta, "¿Está disponible el equipo en condiciones de trabajo cuando se le necesita?". Se utiliza el análisis de disponibilidad para obtener una solución que permita establecer los requisitos para la confiabilidad y la susceptibilidad de mantenimiento. Es útil para determinar cifras significativas del equipo o sistema en sí, como las de frecuencia y tipo de ocurrencia de fallos, posibilidad de reparación (tiempo de reparación activa) y análisis de trabajos de mantenimiento. Por lo tanto, la disponibilidad D se calculará como:

22

$$D = \frac{TPPF}{TPPF + TPPR} \times 100$$

DISPONIBILIDAD DE SISTEMAS.

Tal como en el caso de la confiabilidad, para analizar y medir las características de disponibilidad de un sistema, se debe contar con un modelo matemático del sistema que muestre las relaciones funcionales entre todos los componentes, los sistemas secundarios y el sistema en su conjunto. La disponibilidad del sistema es una función de las disponibilidades de sus componentes. Un modelo de disponibilidad de sistema consiste en cierta combinación de un diagrama de bloque de confiabilidad o un diagrama causa-efecto, una definición de distribuciones de falla y reparación de todo el equipo, y un establecimiento de estrategias de reserva y reparación. Todos los análisis y optimizaciones de disponibilidad se hacen basándose en estos modelos matemáticos conceptuales del sistema. Para efectos de calcular la disponibilidad del sistema, los equipos naturales de trabajo en cada área, utilizarán diagramas de Markov y/o árboles de falla, mediante el uso de software de simulación. En la figura 5 se muestra un ejemplo de configuración de un sistema para el cálculo de su disponibilidad

FIGURA N° 5



$$\text{DISPONIBILIDAD EQUIPO (GT1)} = \frac{\text{TPPF}_{\text{GT1}}}{\text{TPPF}_{\text{GT1}} + \text{TPPR}_{\text{GT1}}}$$

DISPONIBILIDAD SISTEMA = PARA EFECTOS DE CALCULAR LA DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA, EL EQUIPO NATURAL DE TRABAJO QUE APLICA MCC EN CADA AREA, UTILIZARA DIAGRAMAS DE MARKOV Y/O ARBOLES DE FALLA, ESTE ANALISIS DEBE ESTAR SUFICIENTEMENTE DOCUMENTADO DE MODO DE SER REVISABLE

Ejemplo de cálculo de disponibilidad para un sistema

A continuación, se dan algunas relaciones matemáticas entre la disponibilidad del sistema y las disponibilidades de sus componentes, en términos de sus tasas de fallos (constantes) y sus tasas de acciones de mantenimiento (constantes) donde

23

$$\mu = 1/TPPR = \text{Cantidad de fallas} / \text{Cantidad de horas de falla}$$

Considerando al tiempo de fallo igual al tiempo para reparar, y que el tiempo de reparación t sigue la distribución exponencial y es mucho menor que el tiempo t de misión. D_s representa la disponibilidad de un sistema con n componente. Además, en las siguientes relaciones, también se supone que todos los elementos trabajan o fallan independientemente unos de otros. Configuración en serie (ver figura 2)

Expresión ampliada:

24

$$D_s = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_1 \mu_2 + \mu_1 \lambda_2 + \mu_2 \lambda_1 + \lambda_1 \lambda_2}$$

Expresión general para n componentes:

25

$$D_s = \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i}$$

Configuración en paralelo (ver figura 3)

26

$$Ds = \frac{\mu^2 + 2\mu\lambda}{\mu^2 + 2\mu\lambda + 2\lambda^2}$$

Expresión general para el componente activo de un sistema con n componentes, asumiendo $\lambda = \lambda = \lambda$:

27

$$Ds = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i}$$

Expresión ampliada componente en reserva (respaldo), asumiendo $\lambda = \lambda = \lambda$:

28

$$Ds = \frac{\mu^2 + \mu\lambda}{\mu^2 + \mu\lambda + 2\lambda^2}$$

Expresión ampliada componente activo 1 de 3, asumiendo $\lambda = \lambda = \lambda$:

29

$$Ds = \frac{\mu^{3D} + 3\mu^2 + 6\mu\lambda^2}{\mu^3 + 3\mu\lambda^2 + 6\lambda\mu^2 + 6\lambda^3}$$

Expresión ampliada componente activo 1 de 3, asumiendo $\lambda = \mu = \lambda$:

30

$$Ds = 1 - \frac{1}{(\lambda + \mu)^3} (\lambda^3 + 3\mu\lambda^2 + 3\mu^2\lambda)$$

Expresión general para el componente activo m de un sistema con n componentes, asumiendo $\lambda = \mu = \lambda$:

31

$$Ds = 1 - \frac{1}{(\lambda + \mu)^n} \sum_{i=0}^{m-1} \binom{n}{i} \mu \lambda^{n-i}$$

Expresión general para el componente activo m de un sistema con n componentes, asumiendo $\lambda = \mu = \lambda$:

32

$$Ds = \frac{\mu^3 + \mu^2\lambda + \mu\lambda^2}{\mu^3 + \mu^2\lambda + \mu\lambda^2 + \lambda^3}$$

UTILIZACIÓN.

La utilización U , también llamada factor de uso o de servicio, mide el tiempo efectivo de operación de un activo durante un periodo determinado. Su fórmula de cálculo es:

33

$$U = (\text{Cantidad de Horas Operadas} / \text{Cantidad de Horas del Período}) \times 100$$

UTILIZACIÓN DE SISTEMAS

Para calcular la utilización de sistemas se utilizara la misma consideración del punto 6.1.4.1. de este capítulo.

RECOMENDACIONES TÉCNICAS PENDIENTES.

Mide el cumplimiento en la ejecución de las recomendaciones técnicas emitidas sobre un ISED (instalaciones, sistemas, equipos y dispositivos) en un período dado con relación a las totales emitidas.

34

$$\% \text{Recomendaciones Técnicas pend.} = \frac{\text{Recomendaciones Tecn. pendiente acumuladas}}{\text{Recomendaciones Técnicas emitidas}} \times 100$$

BACKLOG.

Indica la carga de trabajo que se tiene para un período determinado en función de la labor disponibles en una semana para ese período.

35

$$\text{Backlog} = \frac{\text{Ordenes de trabajo (HH) pendiente por ejecución}}{\text{HH disponible por semana.}}$$

DESVIACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN.

Indica la efectividad en la planificación de los trabajos de mantenimiento con relación a los ejecutados en campo.

36

$$\% \text{ desvia. Planificac.} = \frac{(\text{HH planificadas} - \text{HH ejecutadas})}{\text{HH planificadas}} \times 100$$

CUMPLIMIENTO DE PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

Mide el cumplimiento de los programas de mantenimiento preventivo de los ISED en un período dado.

37

$$\% \text{ Cumplimien. de Mant. Prevent} = \frac{\text{ODT Mant. preventivo ejecutadas}}{\text{ODT Mant. preventivo programadas}} \times 100$$

INDICE DE RECHAZO UNIDADES REPARADAS.

Índice que mide la calidad de ejecución de los trabajos de mantenimiento y se determina por el número de trabajos rechazados por el custodio del ISED. El tiempo de garantía se considerará 72 horas después de ser probado y operado el ISED. Un fallo ocurrido en el período de prueba no se considera fallo para el cálculo de TPPF y para el cálculo de la confiabilidad.

$$\% \text{ de rechazos} = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ de Ordenes rechazadas}}{\text{N}^{\circ} \text{ de Ordenes ejecutadas}} \times 100$$

INDICE DE TRABAJOS POR PRIORIDAD.

Índice que señala el nivel de ejecución por prioridad de las órdenes de mantenimiento. Estas órdenes pueden ser rutinas, urgencias o emergencias y reflejan la efectividad de la gestión de mantenimiento.

$$\% \text{ ODT por prioridad} = \frac{\text{ODT ejecutadas por prioridad}}{\text{ODT totales ejecutadas}} \times 100$$

VII.-RESUMEN DE INDICADORES

1.-EFECTIVIDAD.

Mide si las acciones de mantenimiento son efectivas en cuanto al comportamiento operacional de las instalaciones, sistemas, equipos y dispositivos (ISED), además, permiten medir la calidad de los trabajos y grado de cumplimiento de los planes de mantenimiento. Así como evaluar si estos planes están siendo efectivos.

TIEMPO PROMEDIO PARA FALLAS (TPPF).

Se refiere al tiempo promedio que es capaz de operar un ISED a capacidad requerida sin interrupciones dentro del periodo considerado del estudio.

53

$$\text{TPPF} = \frac{\text{Horas Operadas}}{\text{Nº de Fallas}}$$

TIEMPO PROMEDIO PARA REPARAR (TPPR).

Se refiere al tiempo promedio en que puede ser reparado un ISED. Entendiéndose como horas de fallas, el tiempo en horas que transcurre desde que el equipo falla, hasta que el equipo es nuevamente puesto en servicio. Es decir, las horas de fallas se consideran igual al tiempo para reparar.

54

$$\text{TPPR} = \frac{\text{Horas de Fallas}}{\text{Nº de Fallas}}$$

DISPONIBILIDAD (D).

Se refiere a la capacidad de un ISED para realizar una función requerida bajo condiciones específicas en un periodo de tiempo determinado, asumiendo que los recursos requeridos son suministrados.

55

$$D = \frac{TPPF}{TPPF + TPPR} \times 100$$

UTILIZACION (U).

Mide el tiempo efectivo de operación de un ISED durante un periodo determinado.

56

$$U = \frac{\text{Horas operadas}}{\text{Horas en el periodo}} \times 100$$

CONFIABILIDAD (C).

Se refiere a la probabilidad de que un ISED pueda realizar una función requerida en un periodo considerado.

57

$$C = e^{\frac{-t}{TPPF}}$$

t = Periodo considerado. $TPPF$ = Tiempo promedio para fallar

RECOMENDACIONES TECNICAS PENDIENTES.

Mide el cumplimiento en la ejecución de las recomendaciones técnicas emitidas sobre un ISED en un periodo dado con relación a los totales emitidos.

58

$$\% \text{ Recomend. Técnicas Pendientes} = \frac{\text{Recomendaciones Tec. Pendientes Acumuladas}}{\text{Recomendaciones Técnicas Emitidas}} \times 100$$

BACKLOG.

Indica la carga de trabajo que se tiene para un periodo determinado en función de las Horas Hombres disponibles en una semana para ese periodo.

59

$$\text{BACKLOG} = \frac{\text{Ordenes de trabajo (HH) pendientes por ejecución}}{\text{HH disponible por semana}}$$

DESVIACIONES DE LA PLANIFICACION.

Indica la efectividad en la planificación de los trabajos de mantenimiento con relación a los ejecutados en campo.

60

$$\% \text{ Desviaciones Planificadas} = \frac{(\text{HH Planificadas} - \text{HH Ejecutadas})}{\text{HH Planificadas}} \times 100$$

CUMPLIMIENTO DE PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

Mide el cumplimiento de los programas de mantenimiento preventivo de los ISED en un periodo dado.

61

$$\% \text{ Cump. De Mtto. Preventivo} = \frac{\text{ODT (Mtto. Preventivo ejecutadas)}}{\text{ODT Mtto. Preventivo Programadas}} \times 100$$

INDICE DE RECHAZO UNIDADES REPARADAS.

Índice que mide la calidad de ejecución de los trabajos de mantenimiento y se determina por el número de trabajos por el custodio del ISED. El tiempo de garantía se considerará 72 horas después de ser probado y operado el ISED. Una falla ocurrida en el periodo de prueba no se considera falla para el cálculo de TRRF y para el cálculo de la confiabilidad.

62

$$\% \text{ de Rechazos} = \frac{\text{Nº de Ordenes Rechazadas}}{\text{Nº de Ordenes Ejecutadas}} \times 100$$

INDICE DE TRABAJOS POR PRIORIDAD.

Índice que señala el nivel de ejecución por prioridad de las Ordenes de mantenimiento. Estas Ordenes pueden ser rutinas, urgencias o emergencias y reflejan la efectividad de la gestión de mantenimiento.

63

$$\% \text{ ODT por prioridad} = \frac{\text{ODT ejecutadas por prioridad}}{\text{ODT totales ejecutadas}} \times 100$$

2.-RENDIMIENTO.

Esta orientado al recurso humano de mantenimiento. En forma general, permite conocer la motivación del personal y refleja sí la cantidad de personal propio es adecuado para la gestión de mantenimiento.

INDICE DE AUSENTISMO.

Mide en forma porcentual las horas ausentes del personal en la ejecución de mantenimiento en relación a las horas totales disponibles en el periodo por causas diferentes a las vacaciones o adiestramiento.

64

$$\% \text{ Ausentismo Laboral} = \frac{HH \text{ ausente (permisos, enfermedad, ausencia injustificada, etc.)}}{HH \text{ disponible (Nº Trabajadores} \times \text{Horas normales del periodo)}} \times 100$$

INDICE DE SOBRETIEMPO.

Mide las horas de sobretiempo laborado por el personal propio en exceso a las horas normales estipuladas. Permite evaluar requerimiento de fuerza hombre, evaluación de programación de trabajo y administración del recurso propio.

65

$$\% \text{ Sobretiempo} = \frac{HH \text{ sobretiempo}}{HH \text{ normales disponibles}} \times 100$$

INDICE DE FH CONTRATADA (%FHC).

Mide la proporción de trabajadores contratados que laboran en la organización de mantenimiento. Permite establecer estrategias en la administración de personal. Este indicador guarda estrecha relación con el sobretiempo en el personal propio.

66

$$\% FHC = \frac{HH \text{ contratadas}}{HH \text{ propia} + HH \text{ contratadas}} \times 100$$

CUMPLIMIENTO PLAN ADIESTRAMIENTO.

Mide el cumplimiento del programa de adiestramiento. En relación con lo programado. El adiestramiento es un elemento de motivación al personal

67

$$\% \text{ Cumpl. del adiestramiento} = \frac{HH \text{ adiestramiento efectuado}}{HH \text{ adiestramiento programado}} \times 100$$

INDICE DE PERSONAL ADIESTRADO.

Mide el esfuerzo de la organización de mantenimiento para adiestrar a su propio personal

68

$$\% \text{ Personal Adiestrado} = \frac{HH \text{ adiestramiento efectuado}}{HH \text{ disponible}} \times 100$$

3.-COSTES.

Estos indicadores sirven para medir cuanto eficiente es la gestión de mantenimiento. Determinan como son distribuidos los costes y si estos están orientados a mejorar la eficiencia de la empresa. Estos indicadores están afectados por la inflación por tanto su control y seguimiento debe ser valorados constantes y el periodo considerado se recomienda sea de 5 años.

COSTE DE MANTENIMIENTO POR UNIDAD DE PRODUCCION.

Mide el costo de mantenimiento por unidad de producción en un periodo dado. Permite visualizar mejoras o deficiencias en el desempeño de mantenimiento en relación a las unidades producidas.

69

$$\text{Costo Mto. /} \frac{\text{Costo total de Mto.}}{\text{Unidad de prod.} \quad \text{Unidades totales producidas del periodo}} \quad X 100$$

COSTE DE MANTENIMIENTO POR HH.

Relaciona el costo de mantenimiento por unidad de horas hombre. Permite visualizar o diferencias en el rendimiento de la fuerza hombre.

70

$$\text{Costo de Mto./HH} = \frac{\text{Costo total de Mantenimiento}}{\text{HH disponibles de Mto.}} \quad X 100$$

RELACION DE COSTE MANTENIMIENTO Vs. PRODUCCION.

Mide la proporción del costo de mantenimiento en relación al costo total de producción.

71

<i>% Costo de Mtn. Vs. Producción</i>	$\frac{\text{Costo Total de Mtn.}}{\text{Costo Total de Producción}} \times 100$
---	--

INDICE COSTE DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

Mide el costo de mantenimiento preventivo con el costo total de mantenimiento. Permite determinar la atención prestada a la prevención de fallas de los ISSED.

72

<i>% Costo Mtn. Preventivo</i>	$\frac{\text{Costo de Mtn. Preventivo}}{\text{Costo Total de Mtn.}} \times 100$
------------------------------------	---

INDICE COSTE DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO.

Relaciona el costo de mantenimiento correctivo con el costo total de mantenimiento. Permite evaluar la eficiencia de los programas preventivos existentes.

73

<i>% Costo Mtn. Correctivo</i>	$\frac{\text{Costo de Correctivo}}{\text{Costo Total de Mtn.}} \times 100$
------------------------------------	--

4.-SEGURIDAD.

Estos indicadores reflejan la seguridad, orden y limpieza con que labora el personal de mantenimiento. Están orientados a ver la gestión de mantenimiento en una forma integral en la empresa. Estos reportes permiten conocer la formación técnica y pericia del personal para ejecutar labores de mantenimiento.

INDICE DE FRECUENCIA BRUTA (IFB).

Es el número de lesiones de trabajos con o sin tiempo perdido ocurridos en un millón de horas hombres de exposición. Entendiéndose como horas de exposición, al número total de horas por todos los trabajadores en la nómina considerada.

74

<i>Indice de frecuencia Bruta</i>	$\frac{\text{Nº de accidentes totales } \times 1 \text{ MMHH}}{\text{HH Exposición en el periodo}}$
---------------------------------------	---

INDICE DE FRECUENCIA NETA.

Es el número de lesiones de trabajos con tiempo perdido o incapacidades ocurridos en un millón de horas de exposición. Entendiéndose como horas de exposición al número total de horas trabajadas de todos los trabajadores en la nómina considerada.

75

<i>Indice de frecuencia Neta</i>	$\frac{\text{Nº de accid. Con tiempo perdido } \times 1 \text{ MMHH}}{\text{HH Exposición en el periodo}}$
--------------------------------------	--

INDICE DE SEVERIDAD.

Es el total de días cargados por lesiones de trabajo con tiempo perdido o con incapacidad ocurridas en un millón de horas hombres de exposición de todos los trabajadores en la nómina considerada.

76

$$\text{Índice de severidad} = \frac{\text{Nº de días totales cargados} \times 1 \text{ MMHH}}{\text{HH Exposición en el periodo}}$$

VIII.-CONCLUSIONES.

- Los indicadores de Mantenimiento Estandarizados y Seleccionados permitirán a la empresa que lo implanta hablar un mismo lenguaje sobre la función de Mantenimiento permitiendo además establecer comparación competitiva (Benchmarking), con las empresas a nivel mundial, esto permitirá conocer cual es el nivel a mantener o superar hacia el futuro.
- Estos indicadores son utilizados por los software's que hacen estudios de Confiabilidad de Equipos e Instalaciones y los Estudios de Análisis de Costes.
- Al calcular la disponibilidad a través del Tiempo Promedio para Reparar y el Tiempo Promedio para Fallar, se logra una mayor relación entre la producción y el parámetro Disponibilidad, igual ocurre con el parámetro Confiabilidad y pronóstico de producción.
- Se trata de evitar las ambigüedades al hablar de Confiabilidad que es un parámetro Probabilístico y Disponibilidad que es Determinístico, en otras palabras Confiabilidad es sinónimo de hacer una encuesta para saber que va a pasar en el futuro; mientras que Disponibilidad es sinónimo de contar los votos una vez concluidas las votaciones. En el pasado esta situación no fue lo suficiente clara.

IX.-REFERENCIAS

1. **ISO (the International Organisation for standardization).** *Norma ISO/DIS 14224 "Petroleum and gas natural industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment"*. 1997.
2. **Center for Chemical Process Safety,** *"Guidelines for Improving Plant Reliability Through Data Collection and Analysis"*, New York, USA, American Institute of Chemical Engineers, 1998.
3. **BARRINGER, H. PAUL.** En *Using Reliability Engineering Principles for Improved Process Performance/or Reliability Engineering Principles*, ASME (Ed.). ASME Professional Development Programs, Houston, Tx., August 4-5, 1997.
4. **O'CONNOR, P.** *Practical Reliability Engineering*. Great Britain; John Wiley & Sons, 1986. 398 p.
5. **BLOCH, H.P.; GEITNER, F.K.** *An introduction to machinery reliability assessment*. USA; Van Nostrand Reinhold, 1990. 372 p.
6. **CARTER, A.D.S.** *Mechanical reliability*. USA; Halsted Press, 1986. 492 p.

ANEXO

DISTRIBUCIONES DE VIDA COMÚNMENTE UTILIZADAS EN ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD.

Distribution	Failure Density Function $f(t)$	Parameter Identification	Applicability in Reliability Analysis
Exponential	$\lambda \cdot \exp(-\lambda t)$	λ = constant failure rate = $\frac{f(t)}{R(t)}$	- applicable to data in the absence of other information - describes a constant hazard rate
Normal	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$	μ = mean σ = standard deviation	- applicable to wearout failures and repair times - restricted to increasing hazard rate
Lognormal	$\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu^*)^2}{2\sigma^2}\right]$	μ^* = mean σ = standard deviation	- to be used when deviations from the model value are by factors, proportions or percentages rather than absolute values - applicable to fatigue failures, repair times and hazard rates - restricted to increasing hazard rate
Weibull (2-parameter)	$\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$	η = characteristic life β = shape factor	- applicable to any failure data since it can handle decreasing, constant and increasing rates

DISTRIBUCIONES DE VIDA COMÚNMENTE UTILIZADAS EN ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD (CONTINUACIÓN).

Distribution	Failure Density Function $f(t)$	Parameter Identification	Applicability in Reliability Analysis
Rectangular (uniform)	$\frac{1}{b}$; $mean = a + \frac{b}{2}$	a = location parameter b = scaling factor	- used to give random variables a uniform distribution over a specified interval for simulation purposes
Gamma	$\frac{1}{b\Gamma(a)} \left(\frac{t}{b}\right)^{a-1} \exp\left(-\frac{t}{b}\right)$	a = shape factor b = scaling factor	- can handle decreasing, constant or increasing data, but less used than the Weibull distribution
Pareto	$a t^{-(a+1)}$	a = shape factor	- usually used in discrete form to describe the distribution of number of failures
Extreme Value	$\frac{1}{b} \exp\left(\frac{t-a}{b}\right) \exp\left[-\exp\left(\frac{t-a}{b}\right)\right]$	a = location parameter b = scaling factor	- has very limited use to investigate extreme and rare values of the phenomenon

