



Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez"
Facultad de Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Análisis y propuesta de mejora a la línea de succión de las bombas de agua alimentar caldera P-52-104 por cavitación.

Autor: Maikel Pérez Alonso.

Tutor: Ing. Israel Martínez Mendosa.

MSc. Lázara Hidalgo Rodríguez.

Cienfuegos, 2014.

"Año 56 de la Revolución"



Facultad de Ingeniería Mecánica

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los que abajo firmamos, certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Firma Información Científico Técnica

Firma Vice Decano

Firma Tutor

Firma Sistema de Documentación de Proyecto

Pensamiento

PENSAMIENTO

"Para cada acción existe una reacción igual y opuesta".

Isaac Newton (1643-1727)
MATEMÁTICO Y FÍSICO

Dedicatoria

DEDICATORIA

*Quiero agradecer y dedicar el esfuerzo a todas aquellas personas que de una forma u otra
me han ayudado a culminar este empeño,*

A todos ellos; desde mi corazón muchas gracias.

*De forma especial a los profesores que impartieron y me dieron todo el conocimiento
aportado por ellos.*

A mis dos tutores por su paciencia, por los conocimientos brindados.

*A mi madre y familia, por estar presentes en mi vida y por impulsarme en mi futuro
minuto a minuto, a los cuales dedico cada paso que doy en mi vida, y a los cuales doy todo
lo que tengo...*

A ustedes lectores por descansar durante 5 minutos para leer esta Tesis

Agradecimientos

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fuerza, el espíritu y la bendición para lograr cada uno de mis objetivos a cada paso que doy.

A mis padres, por brindarme su cariño y apoyo siempre que lo necesito y del cual les estaré agradecido toda la vida.

A mis tutores y revisores, Ing. Israel Martínez Mendosa, el MSc. Lázara Hidalgo Rodríguez y el MSc. Gabriel Orlando Lobelles Sardiñas, por las observaciones y comentarios realizados que contribuyeron a la mejora de mi tesis.

A todos de los que he aprendido algo especial durante mi carrera.

*A aquellos amigos que siempre estarán conmigo pase lo que pase,
gracias.*

Resumen

RESUMEN

Las organizaciones son tan eficaces y eficientes como lo son sus procesos. En tal sentido es importante sentar las bases para la simplificación y optimización de aquellos procesos que mediante la mejora de su operación, contribuyan al logro de los objetivos de la organización. En la refinería de petróleo “Camilo Cienfuegos”, en las actuales condiciones de producción, ocurren reiteradas paradas del proceso provocadas por las fallas en el sistema de vapor, sin que se conozcan las causas que lo originan. El presente trabajo “Análisis y propuesta de mejora a la línea de succión de las bombas de agua alimentar caldera P-52-104 por cavitación”, tiene como objetivo diseñar el sistema de entrada de agua a la succión de la bomba, para garantizar el caudal de alimentación requerido por el proceso tecnológico.

El trabajo comprende un primer capítulo, donde se analiza la bibliografía existente que refiera las características fundamentales de las tuberías de procesos y bombas centrífugas como equipos fundamentales del sistema de alimentación de agua a las calderas. Un segundo capítulo, donde se diseña una metodología de diagnóstico para el proceso de generación de vapor. En el tercer capítulo, se presenta el diagnóstico realizado, donde se identifican las principales causas que originan las fallas, se seleccionan por la votación ponderada las de mayor peso. Finalmente, se presenta una propuesta de mejora con un análisis económico, que resultó ser económicamente factible a pesar de su costo y que responde a los objetivos trazados.

Por último las conclusiones que validan la hipótesis del trabajo y las recomendaciones que conducen a la generalización de los resultados alcanzados.

Índice

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO.....	ii
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	ii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.	
MARCO TEÓRICO Y ESTUDIO DOCUMENTAL.....	3
1.1 Principios y funcionamiento de las bombas centrífugas.....	3
1.2 Características Generales de las bombas.....	4
1.2.1 Partes de las bombas.....	4
1.2.2 Algunas Condiciones de Succión.....	4
1.2.3 Curvas Características.....	6
1.3 Cavitación en bombas centrífugas.....	7
1.3.1 Efectos de la cavitación.....	8
1.4 Selección de los equipos de bombeo.....	14
1.5 Sistemas de tuberías de procesos y bombas centrífugas en plantas de refinación....	17
1.5.1 Sistema de succión.....	17
1.5.2 Sistema de descarga.....	19
1.5.3 Equipo de bombeo.....	20
1.5.4 Estandarización de tuberías.....	22
1.6 Fluidos incompresibles en la industria de la refinación.....	23
1.7 El vapor de agua como portador energético por excelencia.....	25
1.7.1 Ciclo del Vapor.....	26

CAPÍTULO II

PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO PARA EL PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR.....	32
2.1 Caracterización de la Unidad de Negocios, S.A., Refinería Camilo Cienfuegos...	32
2.2 Características del sistema de vapor de la fábrica objeto de estudio.....	36
2.3 Descripción del proceso a diagnosticar.....	37
2.4 Propuesta de metodología para diagnosticar el sistema de generación de vapor de la refinería.....	39
2.4.1 Etapa I: Identificación.....	41
2.4.1.1 Herramientas para el diagnóstico.....	42
2.4.2 Etapa II: Procesamiento y análisis de la información.....	44
2.4.2.1 Herramientas generales.....	45
2.4.3 Etapa III: Presentación del diagnóstico y propuesta de mejora.....	45
2.4.3.1 Selección Ponderada (Multivoting).....	46
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO.....	48

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA DE MEJORA.....	49
3.1 Diagnóstico del proceso de generación de vapor de agua.....	49
3.1.1 Primera etapa: Identificación.....	50
3.1.2 Segunda etapa: Análisis de la información.....	51
3.1.3 Tercera etapa: Presentación del informe y Toma de decisiones.....	55
3.1.4 Presentación de la propuesta de mejora.....	60
3.2 Datos técnicos de las Bombas P-52-104.....	61

3.3 Cálculo de la línea de succión de la bomba de agua de alimentar.....	63
3.3.1 Cálculo de la línea de succión de la bomba de agua de alimentar en condiciones anteriores al estudio.....	63
3.3.2 Cálculo de la línea de succión de la bomba de agua de alimentar que da respuesta a la propuesta de mejora.....	67
3.4 Análisis técnico económico de la propuesta de mejora.....	74
3.4.1 Implicación económica en la propuesta de mejora actual.....	74
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO.....	76
CONCLUSIONES.....	77
RECOMENDACIONES.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXOS.....	80

Introducción

INTRODUCCIÓN

La refinería de petróleo “Camilo Cienfuegos” ubicada en la finca de Carolina, Cienfuegos, fue diseñada para procesar 65 000 Bbls/día de crudo, a partir de un esquema de proceso simple (*skimming*) que incluye un proceso de destilación atmosférica, con una sección de fraccionamiento de gases para su comercialización como GLP (Gas Licuado de Petróleo), una sección de hidrofinación de diesel, una sección de tratamiento de turbo jet (Merox) y una sección de hidrofinación de nafta y reformación catalítica. De estos procesos se obtienen y comercializan productos como GLP, nafta, gasolina, turbo jet, diesel y fuel oil. Para la operación de dichos procesos se consume una gran cantidad de vapor de agua, el cual se genera en el área de calderas, como proceso auxiliar.

Con los años de explotación, los sistemas auxiliares se han deteriorado y provocan reiteradas interrupciones en el proceso operativo de refinación, motivado por la falta de suministro de vapor a las plantas de proceso. Esta situación motivó una búsqueda incesante de las posibles causas, para lo cual se llevó a cabo una reunión técnica, en el área de proceso, con los especialistas de tecnología, técnicos de mantenimiento y operarios de experiencia vinculados a la operación, donde se desarrolló una tormenta de ideas, cuyos resultados se muestran en el segundo capítulo de este trabajo.

Luego de un diagnóstico a los diferentes sistemas que componen la generación de vapor, se pudo comprobar que las causas fundamentales radicaban en el sistema de alimentación de agua para las calderas, por lo que se identificó la siguiente situación problemática:

En el proyecto original Ruso el cabezal de succión de las bombas P-104-1,2,A tenían un diámetro de 250 mm y succionaban de este a 0.5 -1.00 metros y en la etapa de reactivación del área de caldera en el año 2008 se cambiaron las bombas rusas por bombas alemanas de iguales características a la del proyecto y se cambió el cabezal de succión original del proyecto por uno de 100 mm y la succión de las bombas, que tenía un largo de 150 metros, se llevó a 100 metros, con varios codos hasta llegar a la succión de las mismas.

A partir del cambio efectuado cuando aumenta la demanda de agua de alimentación superior a 36 m³/h, debido a la entrada en operación de una segunda caldera, las bombas cavitan y se cae la presión de descarga por debajo de 19.5 kg/cm², lo que provoca varias paradas de las calderas.

Por otra parte, la práctica operacional ha demostrado que el personal de operación en el momento que está arrancando una segunda caldera, se necesitan dos operadores, pues existe poca cobertura operacional respecto a la recirculación de agua al deareador, así como poca cobertura operacional para el arranque de la bomba de reserva.

Ante esta situación se pudo identificar el siguiente problema científico, (Martín.W.F.et.al, 2006), (Lorenzo, 2003).

Problema científico: Deficiencias técnicas en la succión de las bombas, lo que provoca la cavitación de las mismas por problemas de la línea de entrada de agua a las bombas P-52-104.

Hipótesis: Con un nuevo diseño del sistema de entrada de agua a la succión de las bombas, estas podrán alimentar el caudal necesario, disminuyendo consigo las paradas en el proceso.

Objetivo general: Diseñar el sistema de entrada de agua a la succión de la bomba, para garantizar el caudal de alimentación requerido por el proceso tecnológico.

Objetivos específicos:

1. Establecer un marco teórico actualizado que proporcione las herramientas y conocimientos necesarios para enfrentar la situación problemática.
2. Proponer mejoras tecnológicas que permitan disminuir las paradas de las plantas del proceso de refinación, por fallas en el área de generación de vapor.
3. Realizar el cálculo correcto para proponer un nuevo sistema de succión en las bombas de alimentación, que garantice el caudal exigido por las calderas.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO Y ESTUDIO DOCUMENTAL.

1.1 Principios y funcionamiento de las bombas centrífugas.

Las bombas han tenido y tienen un papel decisivo en el desarrollo de la humanidad. No es posible imaginar los modernos procesos industriales y la vida en las grandes ciudades sin la participación de estos equipos.

Están presentes en las grandes centrales termoeléctricas, en las empresas de procesos químico, en las industrias alimenticias. Están presentes también en los equipos automotores. Tiene un decisivo papel en el confort de los grandes asentamientos humanos con el suministro de agua, evacuación de residuales y suministro de aire acondicionado. Los equipos de bombeo en particular son decisivos en los sistemas de riego para la producción agrícola y en los procesos industriales, (McGraw-Hill, 2006).

El sistema de bombeo tiene lugar cuando el flujo entra a la bomba a través del centro u ojo del rodete y el fluido gana energía a medida que las paletas del rodete lo transportan hacia fuera en dirección radial, (Loboguerrero, 1999). Esta aceleración produce un apreciable aumento de energía de presión y cinética, lo cual es debido a la forma de caracol de la voluta para generar un incremento gradual en el área de flujo de tal manera que la energía cinética a la salida del rodete se convierte en cabeza de presión a la salida, (Mattews, 2006).

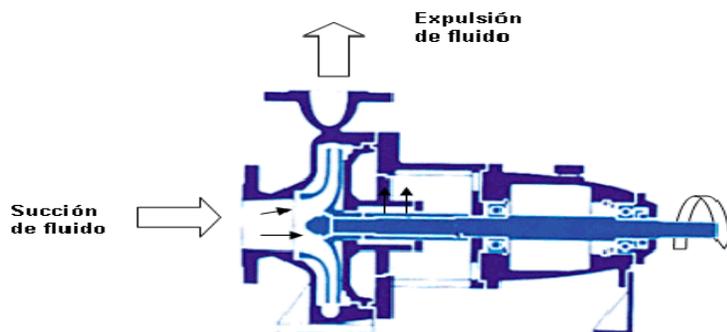


Figura 1.1 Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga.

1.2 Características generales de las bombas

1.2.1 Partes de las bombas.

Carcasa. Es la parte exterior protectora de la bomba y cumple la función de convertir la energía de velocidad impartida al líquido por el impulsor en energía de presión. Esto se lleva a cabo mediante reducción de la velocidad por un aumento gradual del área, (ASME, 1976) .

- **Impulsores.** Es el corazón de la bomba centrífuga. Recibe el líquido y le imparte una velocidad de la cual depende la carga producida por la bomba.
- **Anillos de desgaste.** Cumplen la función de ser un elemento fácil y barato de remover en aquellas partes en donde debido a las cerradas holguras entre el impulsor y la carcasa, el desgaste es casi seguro, evitando así la necesidad de cambiar estos elementos y quitar solo los anillos.
- **Estoperas, empaques y sellos.** La función de estos elementos es evitar el flujo hacia fuera del líquido bombeado a través del orificio por donde pasa la flecha de la bomba y el flujo de aire hacia el interior de la bomba.
- **Flecha.** Es el eje de todos los elementos que giran en la bomba centrífuga, transmitiendo además el movimiento que imparte la flecha del motor.
- **Cojinetes.** Sirven de soporte a la flecha de todo el rotor en un alineamiento correcto en relación con las partes estacionarias. Soportan las cargas radiales y axiales existentes en la bomba.
- **Bases.** Sirven de soporte a la bomba, sosteniendo el peso de toda ella.

1.2.2 Algunas Condiciones de Succión.

Elevación de succión. Es la suma de la elevación estática de succión, de la carga de fricción de succión total y de las pérdidas de admisión (la elevación de succión es una carga de succión negativa).

Carga de succión. Es la carga estática de succión menos la carga de fricción total y las pérdidas de admisión, más cualquier presión que se encuentre en la línea de succión. Es una presión negativa (hay vacío) y se suma algebraicamente a la carga estática de succión del sistema.

Condiciones de succión. Por lo que respecta al líquido, se tomará en cuenta la influencia de su presión sobre la succión.

Presión de vapor. Si un líquido se encuentra a una temperatura arriba de su punto de ebullición, sufre evaporación en su superficie libre. En el seno del líquido se origina una presión que se llama presión de vapor y que está en función directa con la temperatura del líquido.

Presión de bombeo. Destinemos una bomba cualquiera para bombear un líquido. Al funcionar la bomba, tiende a formar un vacío en el seno del líquido. Éste succionar se conoce como presión de bombeo.

Carga neta de succión positiva (NPSH). Es la presión disponible o requerida para forzar un gasto determinado, en litros por segundo, a través de la tubería de succión, al ojo del impulsor, cilindro o carcasa de una bomba. En el bombeo de líquidos la presión en cualquier punto en la línea de succión nunca deberá reducirse a la presión de vapor del líquido.

NPSH disponible. Esta depende de la carga de succión o elevación, la carga de fricción, y la presión de vapor del líquido manejado a la temperatura de bombeo. Si se varía cualquiera de estos puntos, la NPSH puede alterarse.

NPSH requerida. Esta depende sólo del diseño de la bomba y se obtiene del fabricante para cada bomba en particular, según su tipo, modelo, capacidad y velocidad.

Cebado de las Bombas. Consiste en la extracción del aire de la tubería de succión de la bomba para permitir un correcto funcionamiento. Esta operación se realiza en todas las bombas centrífugas ya que no son autocebantes, generalmente cuando ésta se encuentra en una posición superior al tanque de aspiración.

Carga Hidráulica. Es la energía impartida al líquido por la bomba, es decir, la diferencia entre la carga de descarga y la succión.

Punto de Shut-off. Representa la carga hidráulica que produce la bomba cuando el caudal a través de ella es nulo. (La válvula a la salida de la bomba está cerrada, con el fluido en contacto con el rodete).

Potencia Absorbida (N). Representa la potencia requerida por la bomba para transferir líquidos de un punto a otro y la energía requerida para vencer sus pérdidas.

Potencia Hidráulica (pH). Potencia cedida al líquido en el proceso de su transferencia de un punto a otro.

Eficiencia Mecánica. Es la eficiencia relacionada con las pérdidas de energía útil, debidas al rozamiento en el cojinete, prensa-estopas y el rozamiento del fluido en los espacios entre la cubierta del rodete y la carcasa de la máquina, llamado rozamiento del disco y se define para una bomba centrífuga como:

$$\eta_{mec} = \frac{W_{requerida}}{W_{mecanica}}$$

ecuación 1.1

Eficiencia Hidráulica. Se define en términos de la relación entre el trabajo específico ideal de la máquina y el real del rodete, el trabajo específico ideal de la máquina se calcula basado en las condiciones totales o estáticas.

Eficiencia Total. Redefine en términos de la relación entre la potencia eléctrica suministrada a la máquina y la potencia hidráulica entregada por ésta.

1.2.3 Curvas Características.

Antes de que un sistema de bombeo pueda ser diseñado o seleccionado debe definirse claramente su aplicación. Así sea una simple línea de recirculación o un

gran oleoducto, los requerimientos de todas las aplicaciones son siempre los mismos, es decir, trasladar líquidos desde un punto a otro. Entonces, esto obliga a que la bomba y el sistema tengan iguales características para que este diseño sea óptimo. (Birk, 1994)

La manera de conocer tales características se realiza con la ayuda de las curvas características de la bomba, las cuales han sido obtenidas mediante ensayos realizados en un banco de pruebas el cual posee la instrumentación necesaria para medir el caudal, velocidad de giro, momento de torsión aplicado y la diferencia de presión entre la succión y la descarga de la bomba, con el fin de poder predecir el comportamiento de la bomba y obtener el mejor punto de operación el cual se conoce como PME, variando desde una capacidad igual a cero hasta un máximo, dependiendo del diseño y succión de la bomba.

Generalmente este tipo de curvas se obtienen para velocidad constante, un diámetro del impulsor específico y un tamaño determinado de carcasa, realizando la representación gráfica de la carga hidráulica (curva de estrangulamiento), potencia absorbida y eficiencia adiabática contra la capacidad de la bomba.

Estas curvas son suministradas por los proveedores de bombas, de tal manera que el usuario pueda trabajar según los requerimientos de la instalación sin salir de los intervalos de funcionamiento óptimo, además de predecir qué ocurrirá al variar el caudal manejado, sirviendo como una gran herramienta de análisis y de comprensión del funcionamiento del equipo de bombeo.

1.3 Cavitación en bombas centrífugas

Las bombas centrífugas requieren de flujos libres de vapores desde la boquilla de entrada en la succión, hacia el centro del impulsor para funcionar de modo satisfactorio. La presión de operación en cualquier punto nunca debe reducirse más allá de la presión de vapor correspondiente a la temperatura del líquido. Si esto ocurre la presión de vapor se liberará por la acción de la bomba y provoca que el flujo del líquido se interrumpa. Es por ello, que siempre se debe tener suficiente energía disponible en la línea succión para contrarrestar esta

disminución en la presión de bombeo y evitar finalmente el fenómeno conocido como cavitación (Viejo, Z. M, 2003)

Las bombas centrífugas funcionan con normalidad si la presión absoluta a la entrada del rodete no está por debajo de un determinado valor; cuando el líquido a bombear se mueve en una región donde la presión es menor que su presión de vapor, vaporiza en forma de burbujas en su seno, las cuales son arrastradas junto con el líquido hasta una región donde se alcanza una presión más elevada y allí desaparecen; a este fenómeno se le conoce como cavitación, cuyas consecuencias se describen a continuación. (Fernández Díez, 2003).

Según (Viejo, Z. M, 2003), el término cavitación implica un proceso dinámico de formación de burbujas en un líquido. Este fenómeno se produce en el interior de las bombas centrífugas cada vez que la presión de un líquido disminuye más allá de su presión de vapor correspondiente a su temperatura, ocasionando que el líquido se evapore y se formen burbujas de vapor.

1.3.1 Efectos de la cavitación.

Cuando dentro de una bomba en operación sucede el fenómeno antes descrito, esta perturbación en el líquido es arrastrado hasta una zona dentro del impulsor donde alcanza una mayor presión y súbitamente se produce una explosión de burbujas, un efecto similar al golpe de ariete, provocando a su vez daños internos como: ruido, vibración, desgaste o roturas del impulsor e incluso roturas en la carcasa de la bomba, por lo tanto estos efectos reducen la eficiencia y la vida útil de servicio de la bomba.

Las causas que originan la aparición de este fenómeno y los que generalmente se recomiendan que se eviten son los siguientes:

- Carga neta disponible menor a la recomendada por el fabricante.
- Incremento en la temperatura del líquido.
- Capacidad mucho mayor a la capacidad de máxima eficiencia de la bomba.
- Velocidades más altas a las recomendadas por el fabricante.
- Disminución en la presión atmosférica producto de la diferencia de altitud.

- Disminución en la presión de operación.
- Incremento de las pérdidas por fricción debido al exceso de accesorios.
- Separación y contracción del flujo debido a un cambio en la viscosidad del fluido.

Otra recomendación favorable para evitar este tipo de incidentes, es el cebado. El cebado consiste en extraer el aire, gas o vapor que se encuentra en el interior de la bomba para evitar que se acumulen y provoquen la cavitación. Esta operación se realiza generalmente cuando se encuentra en una posición superior al tanque de aspiración.

La cavitación puede identificarse por la presencia de un ruido excesivo y vibraciones muy fuertes en el interior de la bomba, estos efectos se deben a causa de la explosión de las burbujas de vapor cuando la bomba opera a una presión excesiva. Esto indica que la carga neta positiva de succión disponible NPSH_d, es insuficiente teniendo como consecuencias problemas severos de operación, tales como:

- La disminución de la capacidad y el rendimiento de la bomba debido a la turbulencia y el bloqueo del paso del flujo.
- Severos daños estructurales del metal de la carcasa de la bomba y los alabes del impulsor producidos por la picadura y la erosión.

La severidad del deterioro del metal (formación de hoyuelos) que resulta de la cavitación tiende a incrementar a medida que aumentan los requerimientos del NPSH disponible debido al aumento en la fuerza de la explosión de las burbujas.

Los ingenieros deben estar capacitados para detectar rápidamente los signos de la cavitación e identificar correctamente su tipo y la causa que la produzca, para así poder eliminarla o atenuarla con el fin de evitar pérdidas de producción, daños al equipo y lo peor de todo, lesiones al personal. Una comprensión correcta de estos conceptos es una herramienta clave para el diagnóstico y la solución a cualquier problema. Si la bomba funciona en estas condiciones durante cierto tiempo se puede dañar; la intensidad del golpeteo a medida que disminuye la

presión absoluta a la entrada del rodete, se aprecia claramente en las curvas características de la bomba, Figura 1.2

A continuación se describe este fenómeno ilustrado en la Figura 1.3. En la misma, se observa que la presión mínima tiene lugar en el punto M, cerca de la entrada del rodete, por lo que la altura del tubo de aspiración H_a de la bomba centrífuga viene limitada por la cavitación.

Lo más frecuente es que al final del tubo de aspiración exista una depresión, punto E, y que la presión siga disminuyendo desde E hasta el interior del rodete, punto M (presión mínima), zona que se encuentra inmediatamente después de la entrada al mismo, siendo ΔP_{EM} la pérdida de carga correspondiente entre E y M. A partir de M el fluido comienza a notar la influencia del rodete que le comunica una energía cinética relativa, $w_1^2/2g$, aumentando bruscamente su presión, originándose el fenómeno del golpeteo y vibraciones, (Goulds Pumps).

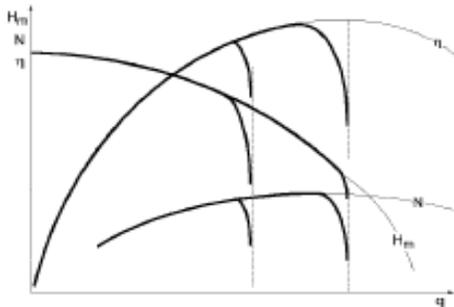


Figura 1.2. Disminución brusca de las curvas características

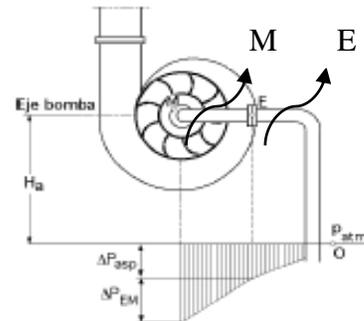


Figura 1.3. Campo de presiones en la aspiración por el efecto de la cavitación en una bomba centrífuga.

La energía o altura específica del líquido al final del tubo de aspiración y entrada en el rodete impulsor, también llamada energía o altura bruta disponible, en condiciones de rendimiento máximo, es:

$$\text{Altura bruta disponible} = \frac{p_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{p_M}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + \Delta p_{EM}$$

$$\frac{p_E - p_M}{\gamma} = \frac{c_1^2 - v_E^2}{2g} + \Delta p_{EM}$$

ecuación

1.2

Para que a la entrada del rodete se presente la cavitación es necesario que la presión $p_M = p_1$, sea igual o menor que la presión parcial de vapor del líquido p_v a la temperatura correspondiente.

Para cada caudal, en el tubo de aspiración existe una presión mínima por encima de la presión de vapor p_v ; por debajo de este valor de p_v la bomba cavitará; ésta presión se puede expresar en metros de columna de líquido (altura neta de entrada en la bomba) y se denomina altura neta de succión positiva NPSH, (*Net Positive Suction Head*) que, teóricamente, para una bomba dada y un caudal dado, es constante.

ALTURA NETA DE ENTRADA DISPONIBLE, NPSH_d.- Para definir esta altura hay que determinar la energía bruta disponible que tiene el flujo a la entrada de la bomba, que se obtiene aplicando la ecuación de Bernoulli entre la entrada al tubo de aspiración, punto O (nivel inferior del líquido), y el final del mismo, punto E, en la forma:

$$\frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{p_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} + H_a + \Delta P_{asp} \quad \text{ecuación 1.3}$$

La altura bruta disponible a la entrada de la bomba es:

$$\frac{p_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{p_0}{\gamma} - H_a - \Delta P_{asp} = \frac{p_{atm}}{\gamma} - H_a - \Delta P_{asp} \quad \text{ecuación 1.4}$$

en la que se ha supuesto que la variación del nivel del líquido es nulo, por lo que, $v_0 = 0$, siendo en general, $p_0 = p_{atm}$

Como el líquido a bombear tiene una determinada presión de vapor p_v , la energía bruta anterior sólo es utilizable hasta dicha presión p_v , a partir de la cual aparece la cavitación, por lo que se define la *altura neta disponible a la entrada de la bomba* NPSH_d de la forma:

ecuación 1.5

$$NPSH_{d} = \text{Altura bruta} - \frac{p_v}{\gamma} = \frac{p_{atm}}{\gamma} - H_a - \Delta P_{asp} - \frac{p_v}{\gamma} = \frac{p_{atm} - p_v}{\gamma} - H_a - k_{asp} q_1^2$$

que representa una familia de parábolas, Figura 1.4, al ser, $\Delta P_{asp} = k_{asp} q_1^2$, y que no es más que la curva característica de la instalación que sólo afecta al tubo de aspiración, siendo independiente del tipo de bomba instalada.

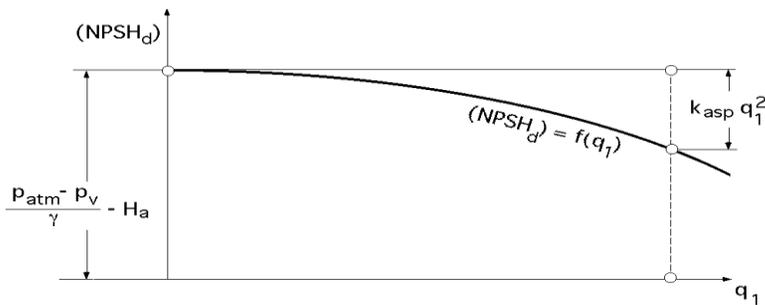


Figura 1.4. Altura neta de entrada disponible

ALTURA NETA DE ENTRADA REQUERIDA, NPSH_r.- La bomba necesita que el flujo disponga en la posición E de un mínimo de energía para hacer el recorrido, sin que aparezca cavitación, desde dicha entrada E hasta el punto M de mínima presión en el interior del rodete Figura 1.3, en el que comienza a recibir energía; **el límite de esta presión mínima es p_v.**

Si se supone que los puntos E y M están al mismo nivel y teniendo en cuenta que p_v es la presión mínima que se puede tener en el punto 1, *la altura bruta a la entrada de la bomba es:*

$$\text{Altura bruta disponible} = \frac{p_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + \Delta P_{EM} = \frac{p_v}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + \Delta P_{EM}$$

ecuación 1.6

La altura neta requerida a la entrada del rodete es, Figura 1.5: ecuación 1.7

$$NPSH_r = \text{Altura bruta} - \frac{p_v}{\gamma} = \frac{p_E - p_v}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{p_v}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + \Delta P_{EM} - \frac{p_v}{\gamma} = \frac{c_1^2}{2g} + \Delta P_{EM}$$

ALTURA DE ASPIRACIÓN H_a.- Para determinar la altura de aspiración H_a se toma el caudal máximo previsto q_{máx} (que es con el que más riesgo de cavitación existe) sobre el eje de caudales del gráfico suministrado por el fabricante de la bomba, Figura 1.6.

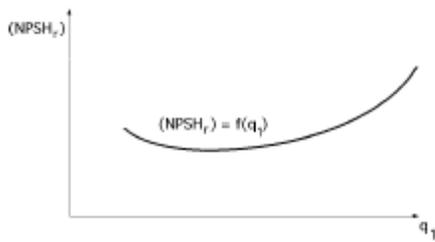


Figura 1.5 Altura neta de entrada requerida

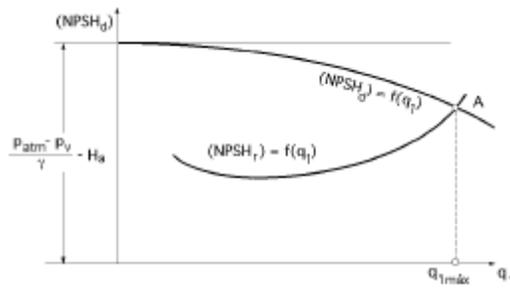


Figura 1.6 Altura de aspiración máxima

De las infinitas curvas NPSHd que se tienen en una instalación, función de la altura de aspiración H_a , sólo una pasa por el punto A, Figura 1.6, verificándose que es la máxima altura de aspiración teniendo en cuenta la cavitación.

$$NPSH_r = NPSH_d = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - H_a - \Delta P_{asp \text{ máx}} \Rightarrow H_a = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - \Delta P_{asp \text{ máx}} - NPSH_r$$

ecuación 1.8

El siguiente esquema explica el fenómeno de cavitación.

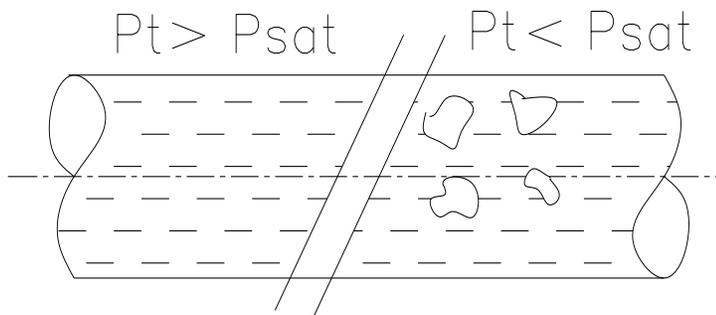


Figura 1.7 Representación del fenómeno de cavitación.

Donde:

Pt. – presión en el interior de la tubería.

P sat – Presión de saturación para la temperatura del líquido.

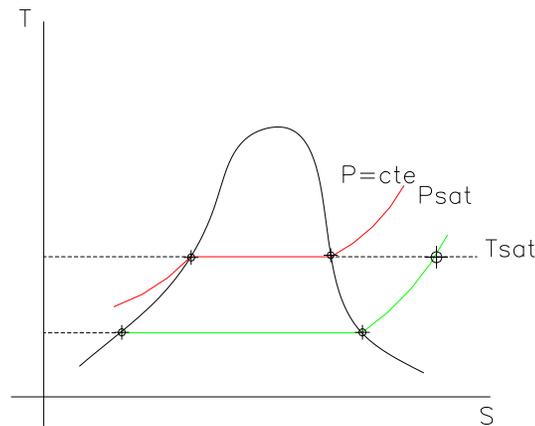


Figura 1.8 Diagrama de la Curva de la temperatura con respecto a la saturación.

1.4 Selección de los equipos de bombeo

“La selección de la bomba adecuada para cualquier aplicación entre la multitud de estilos, tipos y tamaños puede ser difícil para el usuario o el contratista de construcción. El mejor método es hacer investigaciones preliminares, llegar a decisiones básicas y selecciones preliminares y analizar la aplicación con el proveedor de la bomba,” (Neerken Richard, 2000), (PÉREZ BARRETO, 2004) La primera fuente a la que debe recurrirse para obtener información sobre las bombas es la placa de datos (Birk, 1994) que estos equipos traen consigo, la cual proporciona información útil y necesaria para su identificación y evaluación. (Campos Abella J.C, 2010)

Con la información de placa (marca, modelo, velocidad, diámetro y tipo de impulsor) se puede recurrir a los catálogos del fabricante para obtener las características técnicas (curvas características, carga vs. caudal, eficiencia vs. caudal, NPSH vs. caudal, etc.) de la bomba o bombas de interés.

La selección de un equipo de bombeo involucra muchos aspectos. No es sólo la satisfacción de la carga de impulsión (H) y el de flujo (Q) solicitados por el proceso y que físicamente se manifiestan en el sistema de tuberías, accesorios y equipos en el que está insertada la bomba, sino que debe considerarse también la agresividad química del fluido, la presencia o no de partículas en suspensión y las características

abrasivas de las mismas, así como otras muchas que harían un extenso listado, (Fernández Díez, 2003), (McNaughton, 1984).

Según (McNaughton, 1984), la clave para hacer la selección correcta de la bomba radica en el conocimiento del sistema en que trabajará la bomba. El ingeniero que especifica una bomba puede hacer una selección errónea por no haber investigado los requisitos totales del sistema ni determinar cuál debe ser el rendimiento de la bomba.

En el proceso de selección es de mucha necesidad saber trabajar con las características hidráulicas de las máquinas, (ASME, 1976). En la industria de procesos químicos, el punto de partida son las hojas de flujo del proceso y los diagramas de tuberías e instrumentos.

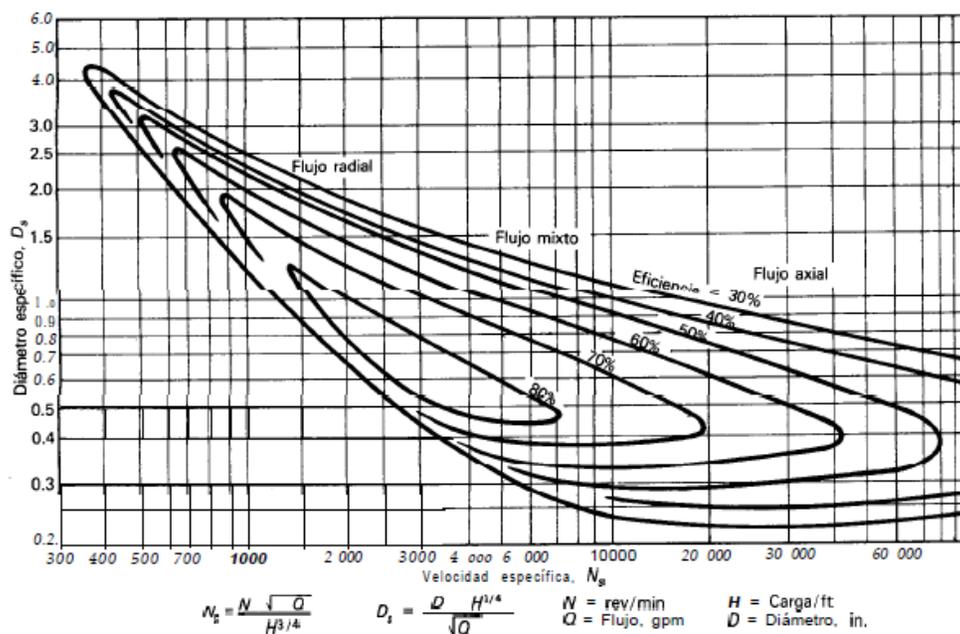


Figura 1.9 La gráfica de velocidad específica es una gran ayuda en la selección preliminar de bombas centrífugas de una velocidad.

En ellas queda expresado gráficamente el comportamiento de los parámetros principales de funcionamiento como son la carga de impulsión (H) expresada en (m), el flujo caudal (Q) (m^3/s), la potencia consumida (P ó N) (kW) y el rendimiento general de la bomba (η_b) (%). En muchas características hidráulicas los fabricantes incluyen

otra característica o curva denominada MPS requerido. Todo esto obliga a considerar algunos criterios para la selección de las bombas, a saber:

- Por el criterio de Velocidad Específica: Criterio adimensional de clasificación general de las bombas centrífugas, Ésta caracteriza en condiciones determinadas la capacidad de crear altura para una capacidad dada.
- Por satisfacción del punto de operación. (Satisfacer H y Q), gráficamente el punto de intersección de la curva de la bomba con la del sistema, es el punto operacional de la misma, como se muestra en la figura 1.10 De acuerdo a la altura o carga de impulsión las bombas centrífugas se pueden ser, por la carga de impulsión: Baja, Media y Elevada. Siempre se cumple que para grandes alturas la velocidad específica debe ser baja, (Martínez Díaz, 2006).

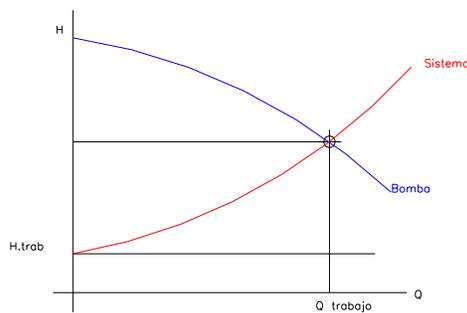


Figura 1.10 Curva de selección de la bomba a partir de altura con respecto al caudal.

Otros criterios de selección de bombas centrífugas son:

- Selección tomando en consideración el fluido.
- Selección tomando en consideración el material.
- Selección por la carga de aspiración.
- Selección del motor.
- Selección Económica. (Sistema – Bomba.)

1.5 Sistemas de tuberías de procesos y bombas centrífugas en plantas de refinación

La industria de la refinación del petróleo es uno de los procesos industriales más complejos y el que requiere mayor variedad de bombas, debido a las necesidades muy singulares que se tienen en algunos procesos, donde con frecuencia se necesitan fluidos de alta presión y temperatura. Para cubrir determinadas condiciones de corrosión se han creado diseños específicos de bombas, llamadas bombas para procesos.

Según la forma en que imparten la energía al líquido, las bombas de proceso se clasifican en bombas dinámicas (que imparten energía cinética mediante la acción de una fuerza centrífuga) y bombas de desplazamiento positivo (que imparten un desplazamiento parcial o total de un volumen de líquido mediante la acción de un dispositivo mecánico: pistón, diafragma, tornillo o de engranajes).

Las bombas dinámicas constituyen la mayor parte del servicio dentro de la industria de la refinación, en especial las bombas centrífugas debido a las principales ventajas que se le atribuyen.

Sin embargo, el buen desempeño de una bomba, la eficiencia de la misma, está condicionada fundamentalmente por un buen diseño de su sistema de tubería, ya sea el sistema de succión o el sistema de descarga

1.5.1 Sistema de succión.

Cuando un proceso requiere de la instalación de cualquier bomba lo primero es el diseño preliminar del sistema, este punto debe estudiarse con cuidado prestando especial interés en la tubería de succión para evitar severos problemas, tales como: El sobredimensionamiento de tuberías.

- Carga neta positiva de succión disponible insuficiente.
- Estimación errónea sobre la capacidad de la bomba.
- Mala distribución del sistema de tuberías provocando una inestabilidad hidráulica.
- Excesos de accesorios que propicien a la vibración y ruido dentro de la tubería.

- Efectos de golpes de ariete.
- Problemas de cavitación debido a la presencia de aire.
- Desgaste excesivo de las chumaceras de la bomba.

Un análisis correcto de las condiciones del proceso, relaciones hidráulicas y configuración del sistema asegurará el no tener problemas con la instalación y el funcionamiento adecuado de la bomba.

La clave para realizar una selección adecuada de la bomba, radica en el conocimiento total del sistema en que trabajará la misma. El ingeniero que especifica una bomba, puede hacer una selección errónea por no haber investigado los requisitos totales del sistema y determinar cuál debe ser el rendimiento adecuado de la bomba. Además, cuando la responsabilidad de la selección de la bomba está en manos del representante del proveedor, puede serle difícil o imposible determinar los requisitos totales. Es por eso que la primera regla para la selección de una bomba es el conocimiento completo del sistema.

Presión de succión.

La presión de succión es la cantidad de energía ejercida por la bomba para transportar un líquido que se encuentra almacenado desde un recipiente hasta el centro del impulsor.

La presión de succión puede ser positiva o negativa dependiendo de la posición relativa del recipiente de almacenamiento. Su determinación se especifica a un nivel de referencia arbitrario de 0.6 m (2 ft) sobre el nivel de referencia del piso y está representada por la siguiente ecuación (PDVSA, 1996), (Viejo, 2003):

$$P_{succ} = P_s + \Delta P_{h-s} - \Delta P_{T-s}$$

ecuación 1.9

Donde:

P_{succ} = presión de succión del sistema, psig

P_s = presión absoluta sobre la superficie del líquido en el recipiente de succión ($P_{atm} + P_{man}$) ó ($P_{atm} - P_{vacío}$), psia

P_{h-s} = caída de presión por altura de la tubería de succión, psi

$PT-s$ = caída de presión por fricción total en la tubería de succión ($\Delta P + \Delta P_{acc}$), psi

P_{acc} = caída de presión por fricción total de las válvulas y accesorios, psi.

La caída de presión dinámica o energía cinética del fluido generalmente se considera despreciable en la ecuación 1.9, debido al valor mínimo que representa en comparación con las otras pérdidas de energía consideradas y más aún cuando los diámetros de la tubería de succión y de descarga son iguales (G. D. E GUAYCOCHEA, 1992)

1.5.2 Sistema de descarga.

El objetivo de diseñar un sistema de tuberías es de asegurarse que se tenga el flujo deseado con el mínimo costo total. Las tuberías de descarga generalmente se diseñan con base a un balance económico de los costos iniciales de la tubería, accesorios, costos de operación y de mantenimiento, en contraste con el diseño de un sistema de succión.

Los factores principales para establecer un diámetro de descarga más económico son las características de la bomba, los requisitos del sistema y la ubicación del equipo. En el caso de situaciones cuando se requieran de un gran diámetro se suele realizar una comparación de los costos de manera más detallada para elegir entre los posibles diseños para la tubería. El diseño económico con base a estos factores implica reducir la pérdida de energía por fricción sobre la descarga de la bomba, es decir; que la trayectoria de la tubería desde la bomba hasta el recipiente de descarga debe ser lo más directa posible con el fin de mantener los cambios de dirección al mínimo y evitar los excesos de accesorios en el sistema.

Las tuberías de descarga se caracterizan en relación a la tubería de succión por la presencia de filtros, válvulas, accesorios o equipos con la finalidad de poder controlar y manipular el flujo hasta su punto de entrega. Su determinación es el resultado de considerar las presiones o caídas de presión involucradas en el sistema, tales como:

La presión en el punto de entrega, este valor es independiente del flujo y es el punto donde se controla la presión a la cual está descargando la bomba (normalmente un recipiente), o la presión atmosférica en el caso de tanques de almacenamientos atmosféricos.

- La presión estática, es el resultado de la diferencia de elevación entre el eje central o el nivel de referencia de la bomba y el nivel del líquido en el recipiente de descarga o el punto de descarga final de la tubería. Por lo tanto se considera la altura máxima del líquido para obtener el máximo cabezal de elevación requerido.
- La caída de presión debido a la presencia de válvulas y accesorios en el circuito de descarga, así como equipos de procesos, tales como: intercambiadores de calor, hornos, reactores, medidores de flujo, filtros, válvulas de control, entre otros.

Presión de descarga.

La presión de descarga es la cantidad de energía ejercida por la bomba para transportar y descargar un líquido en un recipiente a una determinada altura. Su determinación está representada por la siguiente ecuación (PDVSA, 1996) (Viejo, 2003):

$$P_{des} = P_d + \Delta P_{h-d} + \Delta P_{T-d} + \Delta P_{eq-d}$$

ecuación 1.10

Donde:

P_{des} = presión de descarga del sistema, psig

P_d = presión absoluta sobre la superficie del líquido en el recipiente de descarga ($P_{atm} + P_{man}$) ó ($P_{atm} - P_{vacío}$), psia

ΔP_{h-d} = caída de presión por altura en la tubería de descarga, psi

P_{T-d} = caída de presión por fricción total en la tubería de descarga ($\Delta P + \Delta P_{acc}$), psi

P_{acc} = caída de presión por fricción total de las válvulas y accesorios, psi

P_{eq-d^*} = caída de presión por equipos presentes en el sistema de descarga, psi

1.5.3 Equipo de bombeo.

Cuando se dispone de todos los datos del sistema tanto en la línea de succión como la de descarga es posible determinar la potencia hidráulica que desarrolla la bomba para transportar el líquido.

La potencia hidráulica es la cantidad de energía hidráulica que recibe un líquido a la salida de la bomba para ser transportado de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud, esta se calcula del mismo modo para todos los tipos de bombas y básicamente se originan a partir de un balance de energía mecánica entre los puntos de succión y descarga de la bomba (Viejo, 2003).

La potencia al freno o potencia de flecha en el eje del motor de la bomba (*BHP*) se define como la cantidad de energía mecánica necesaria para transformar una cierta cantidad de fluido en energía de presión. Este valor generalmente suele ser proporcionado por el fabricante a través de las curvas características de la bomba o puede ser obtenido midiéndose directamente con un dinamómetro o bien indirectamente por un *wattmetro* trifásico que indica la potencia eléctrica consumida por el motor.

La eficiencia total de una bomba se define como el consumo mínimo de energía necesaria para bombear un líquido a presión a través de toda la trayectoria del sistema de descarga, este valor total incluye las eficiencias mecánica, hidráulica y volumétrica y se relaciona entre la potencia entregada al fluido y la potencia recibida en el eje del motor de la bomba.

Se estima que los valores de la eficiencia varía en un intervalo de un 40 a 90 % según la velocidad rotación específica del motor (Viejo, 2003).

$$HP = \frac{P_{dif} \cdot Q}{1714} = \frac{H \cdot Q \cdot sp.gr.}{3960}$$

ecuación 1.11

$$P_{dif} = P_{des} - P_{succ}$$

ecuación 1.12

Donde:

η = eficiencia total de la bomba, %

HP = potencia hidráulica entregada por la bomba, hp

BHP = potencia al freno en el eje del motor de la bomba, hp

Con la disponibilidad de estos datos es posible construir una curva de carga-capacidad del sistema para determinar el punto de operación o de máxima eficiencia de la bomba y posteriormente evaluar los resultados y verificar si es necesario realizar alguna modificación en el diseño del sistema. Posteriormente para poder

realizar una oferta de una bomba apropiada al fabricante se le proporciona los siguientes datos:

- Las características del líquido; flujo, propiedades, temperaturas y presiones.
- Tipo de accionador (eléctrico o vapor) y requerimientos constructivos de la bomba en función del servicio que va realizar.

1.5.4 Estandarización de tuberías.

Las tuberías de plantas de procesos son de sección circular y son las más difundidas de todas las estructuras hidráulicas, ya que es la más adecuada y ventajosa para la conducción de diversos fluidos, su forma no solo ofrece mayor resistencia estructural sino también mayor sección transversal que cualquier otra.

El Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI), y el Instituto Americano del Petróleo (API), han establecido normas dimensionales para los componentes de tuberías que se utilizan con mayor frecuencia en las plantas de proceso. El código ANSI B31 es el único requisito codificado que se conoce para tuberías a presión, el cual prescribe los requisitos mínimos de los materiales, diseño, fabricación, ensamble, soporte, instalación, examen, inspección y pruebas de los sistemas de tuberías sujetas a presión o vacío.

El código ANSI B31 consiste de ocho secciones que se publican como documentos independientes por su sencillez y conveniencia. El cual, se encuentran especificaciones sobre materiales de tuberías y accesorios y métodos de prueba de la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), especificaciones de la Asociación Americana de Soldadura (AWS) y las normas de la Sociedad de Fabricantes de Estandarización de Válvulas y Accesorios (MSS). Muchas de estas normas contienen relaciones de presión y temperatura que sirven como ayuda a los ingenieros en su trabajo de diseño.

Cada una de las secciones del código ANSI B31, difieren ampliamente en sus prohibiciones de uso de materiales, componentes o métodos de montaje y esas prohibiciones se refieren con frecuencia al diámetro de las tuberías, el fluido que se maneja y el ambiente circundante. En la Tabla 1.1 se muestra el contenido del código B31 en su emisión de diciembre de 1980.

Tabla 1.1 Estado del código ANSI B31 para tuberías a presión. Fuente: (Perry, 1992).

Designación y número de norma	Alcance y aplicación	Observaciones*
Tubería de potencia B31.1.0	Para todas las tuberías en centrales generadoras de vapor	Último número: 1980
Tuberías para gases combustibles B31.2	Para gases combustibles de centrales generadoras de vapor y edificios industriales	Último número: 1968
Tubería para plantas químicas y refinerías petroleras B31.3	Para todas las tuberías dentro de los límites de las instalaciones dedicadas al procesamiento y manejo de productos petroquímicos y conexos, salvo aquellos proscritos por el código.	Último número: 1980
Tuberías de transporte de aceites B31.4	Para productos líquidos, crudos o refinados en líneas de tuberías por todo el terreno	Último número: 1979
Tuberías para refrigeración B31.5	Para tuberías de refrigeración en unidades embaladas y edificios comerciales públicos	Último número: 1974
Tuberías para energía nuclear B31.7	Para fluidos cuyas pérdidas en el sistema podrían causar riesgos de radiaciones para el personal de la planta o el público en general	Véase la sección 3 del Código ASME para calderas y recipientes a presión
Sistemas de distribución y transmisión de gases B31.8	Para gases de tuberías por todo el terreno, así como también para líneas de distribución de las ciudades	Último número: 1975

La norma ANSI B31.3 cubre todas las tuberías para las plantas en refinerías petroleras, terminales de carga, procesamiento de gas y plantas de compuestos o patios de tanques de refinería, así como las líneas de interconexión entre las secciones de una refinería.

1.6 Fluidos incompresibles en la industria de la refinación

Los líquidos juegan un papel muy importante en la industria de la refinación pues constituyen la mayor parte del transporte en tuberías en relación a los gases o

vapores, su transporte por medio de bombas a través de las líneas de procesos o de servicios auxiliares es parte fundamental para la operación dentro de una planta, ya sea para su recirculación o alimentación a los equipos de procesos.

En las líneas de procesos se transportan generalmente productos terminados, tales como: gasolina, combustóleo, turbosina, diesel, entre otros.

En las líneas de servicios se transporta por lo general agua, donde es llevada a las calderas para la generación de vapor y mediante los turbogeneradores producir la energía eléctrica para el servicio de todas las plantas del proceso.

Agua de proceso.

El agua en el proceso es utilizada como reactivo, disolvente o como agente de enfriamiento de contacto directo. El suministro típico de agua para las distintas plantas de proceso suele ser dividido en líneas de servicio como: agua de enfriamiento, agua para alimentación a calderas, agua para uso sanitario, red contraincendios y agua para servicios varios. Normalmente, para este servicio se requiere agua de gran pureza, con el fin de evitar cualquier tipo de contaminación. En estos casos se utiliza agua tratada y desmineralizada o condensada sin contaminar. La presión de este sistema depende de la presión del proceso.

Agua de alimentación a calderas.

Las calderas modernas a alta presión requieren de agua altamente purificada. El agua se lleva a cabo por un proceso de pre-tratamiento para clarificarla y eliminarle las impurezas (debido a que la mayor parte del agua es proveniente de lagos o ríos). El agua se desmineraliza a base de resinas de intercambio iónico que se regeneran en presencia de ácido sulfúrico al 98 % y sosa cáustica al 50 %, al término de este proceso el agua recibe el nombre de agua tratada, y finalmente se alimentan a las calderas para generación de vapor (PEMEX, 2002).

Agua de enfriamiento

Los condensadores y enfriadores refrigerados por agua son los que utilizan mayor cantidad de agua en una planta de proceso. Las torres de enfriamiento son un medio universalmente utilizado para el enfriamiento de grandes cantidades de agua. Este servicio de recirculación envía agua a los condensadores y enfriadores a una temperatura promedio de 26 °C a 32 °C y es devuelta a la torre a una temperatura

máxima de 48 °C. El equipo de bombeo empleado generalmente se diseña con un factor de seguridad del 10 % al 15 % de su capacidad y la presión normal de operación se encuentra de 50 psig a 75 psig. Esta presión debe ser lo suficiente para vencer todas las resistencias y las diferencias de altura presentes en la trayectoria de la tubería para retornarla por la parte superior de la torre de enfriamiento que generalmente se encuentran a una altura de 35 ft a 40 ft, sobre el nivel de la bomba. No obstante, en este tipo de sistema de circulación cerrada la caída de presión de la tubería debe ser cuidadosamente verificada con la finalidad de evitar severos daños en el equipo de bombeo (Howard, 1982).

Agua de servicio.

El agua de servicios es utilizada para la limpieza en áreas, equipos, ensayos de equipos y servicios de mantenimiento, donde el agua proviene generalmente de alguna fuente natural como ríos, pozos, etc., o parte del agua tratada proveniente del tratamiento de agua del servicio sanitario. La presión de este sistema generalmente se encuentra de 30 psig a 40 psig (Howard, 1976).

1.7 El vapor de agua como portador energético por excelencia

En este epígrafe se explica el comportamiento del vapor de agua por ser el área de generación de vapor donde se realiza este estudio y donde se explota las bombas centrífugas.

El agua es un elemento común en todos los procesos industriales y de servicios, por lo tanto no solo debe ser vista como elemento natural, en cuyo uso, tratamiento y distribución se consume gran cantidad de energía, sino como portador energético por excelencia desde la fase de vapor, entonces puede constituir un factor limitante en el desenvolvimiento económico de las actividades industriales. El vapor de agua es un servicio muy común en la industria, que se utiliza para proporcionar energía térmica a los procesos de transformación de materiales a productos, por lo que la eficiencia del sistema para generarlo, la distribución adecuada y el control de su consumo, tendrán un gran impacto en la eficiencia total de la planta. Esta situación se refleja en los costos de producción del vapor y, en consecuencia, en la competitividad y sustentabilidad de la empresa. El vapor de agua constituye la sustancia de trabajo

idónea, prácticamente insustituible por las ventajas que ofrece, constituyendo su generación efectiva uno de los aspectos técnico de más relevancia y complejidad a lo largo de todo este proceso.

1.7.1 Ciclo del Vapor.

El ciclo hidrológico se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida y si la transferencia de agua desde la superficie de la tierra hacia la atmósfera, en forma de vapor de agua, se debe a la evaporación directa, a la transpiración por las plantas y animales y por sublimación, pues si se razona cuál es el ciclo del vapor, se pudiera pensar en que es la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua a medida que varía la temperatura en función de la presión, verifica cambios de estados conocidos como:

- Vaporización: cambio de estado de líquido a gaseoso
- Condensación: cambio de estado de gas a líquido

Se denominan vapores aquellos gases que en condiciones normales de presión y temperatura (1 atm y temperatura ambiente) su estado normal es el estado líquido; así, se debe decir vapor de agua y no gas de agua y a su vez gas de oxígeno y no vapor de oxígeno.

En el agua el calor de vaporización a 100 °C es de 539,11 kCal/kg y a su vez si se enfría es vapor de agua a 100 °C, éste nos da un calor de condensación de 539,11 kCal/kg. Estos valores son variables en función de la presión en que se verifica el cambio de estado. **Ver Figura 1.11**

Al adicionar calor al hielo, la temperatura se incrementa hasta alcanzar 0° C y la cantidad total de calor requerida en este u otro proceso similar se denomina calor sensible. Mientras la cantidad de calor requerido para incrementar la temperatura de 1 kg de hielo en 1 °C se denomina calor específico del hielo.

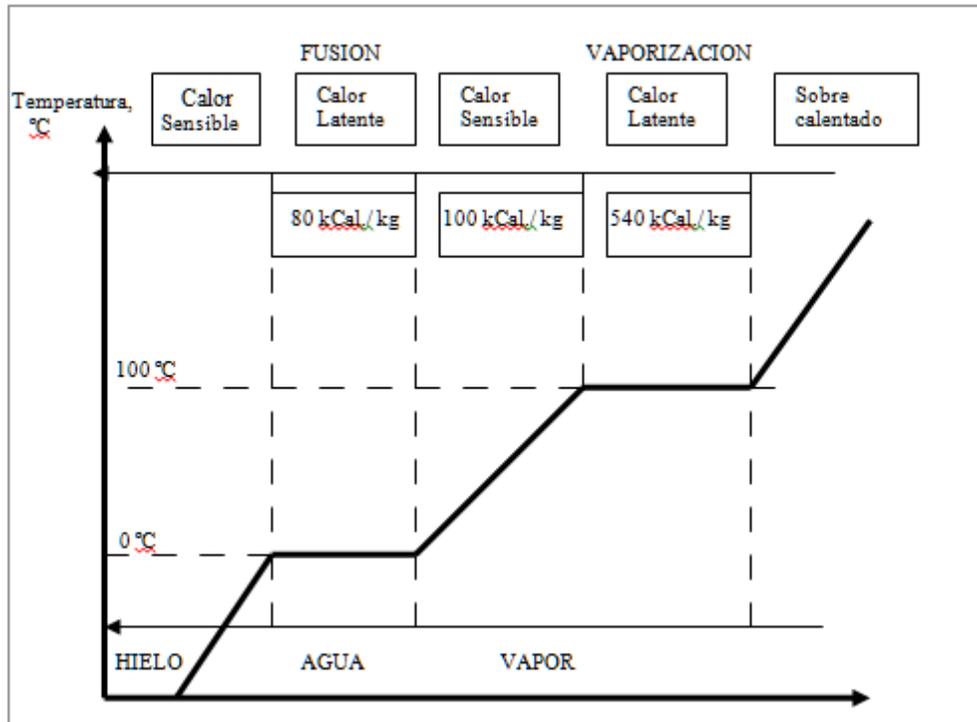


Figura 1.11 Comportamiento del agua cuando es calentada.

Para que el hielo alcance 0 °C, (su temperatura no se incrementa bruscamente como se observa en el gráfico anterior), el calor se utiliza para provocar un ordenamiento interior del hielo. Cuando una determinada cantidad de calor ha sido absorbida, el hielo se funde y se vuelve agua, esta cantidad de calor se define como Calor Latente de Fusión del hielo a 0 °C y se define como el punto de Congelación del Agua.

Si el agua es calentada en un recipiente abierto y la temperatura se incrementa a 100°C, el calor absorbido en el proceso es otra vez Calor Sensible e igualmente el Calor específico del agua es la cantidad de calor requerido para incrementar la temperatura de 1 kg en 1 °C. En la superficie del agua las moléculas salen a la atmósfera y la fuerza en estos procesos se denomina Presión de Vapor.

Las moléculas en la superficie del líquido están en equilibrio entre el líquido y la fase de vapor (ambas fases están a la misma temperatura y presión), el vapor en la superficie del líquido se dice que está Saturado.

Cuando la temperatura del agua alcanza 100 °C, su temperatura se mantiene otra vez constante hasta que ha sido absorbido suficiente calor para cambiar a vapor, la cantidad de calor absorbido es el Calor Latente de Vaporización.

A 100 °C la presión de saturación de el agua es igual a la presión atmosférica y ebulle, esta temperatura se define como Punto de Ebullición del agua, sin embargo si el agua no estuviera en un recipiente abierto sometido a la presión atmosférica, pero estuviera un vacío parcial o estuviera en una presión superior, la presión de vapor saturado sería igual a la presión en la superficie del líquido a una temperatura diferente, esta temperatura será un nuevo punto de ebullición del agua a esta presión.

El término Punto de Ebullicion es quizás inapropiado y es preferible usar el término temperatura de saturacion para la temperatura a la que la presión de vapor saturado se iguala a la presión en la superficie del líquido. El calor latente de vaporización de una sustancia varía en su presión de saturación.

El calor específico del vapor sobrecalentado depende de un modo u otro si es calentado a volumen o presión constante.

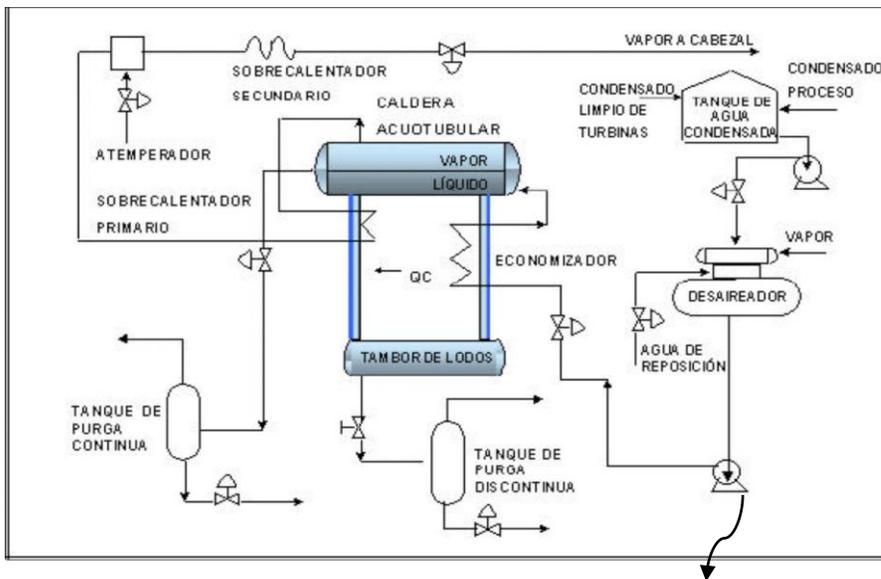
En general, si la presión en un vapor sobrecalentado se incrementa y la temperatura se mantiene constante, el vapor eventualmente alcanzaría la condición de saturación y se licuara.

El aire y el agua (el condensado del vapor) se presentan en la práctica como una mezcla durante la operación del equipo.

La importancia que para la economía de cualquier país, independientemente de su grado de desarrollo, tiene la generación de vapor de agua es obvia. Basta decir que en el caso Cuba, sectores productivos como el Azúcar, Termoeléctrica, y Refinerías de petróleo, cuentan con más de mil generadores de vapor de agua, (SGC, 2013).

Dentro de la industria del petróleo, están comprendidas las refinerías con un consumo considerable de vapor de agua. En ellas se incluye la fábrica objeto de estudio. Generalmente en los procesos de refinación de petróleo, la producción de vapor se realiza con un sistema integrado de producción, donde intervienen los generadores de las casas de calderas y las calderas recuperadoras.

En la **Figura 1.12** se representa el caso típico de una caldera acuatubular para la generación de vapor. Generalmente en la formación del vapor de agua en una caldera existen tres procesos que se encuentran combinados: radiación, conducción y convección. Por ejemplo en la caldera cuando ocurre la combustión: los gases calientes transmiten su energía en forma de calor a la superficie de transferencia de calor mediante la radiación; a través de la superficie de transferencia que son los tubos, se transmite el calor mediante la conducción; y finalmente en el agua de la caldera el calor se transmite por convección.



Bomba de alimentación P-52-104

Figura 1.12 Generación de Vapor en un Generador Acuatubular

En estos procesos la presencia del aire y del condensado influyen de forma considerable en la disminución de la transferencia de calor y por consiguiente impone la necesidad de su eliminación permanente durante la operación del equipo, (Campos Avella, 2001). De aquí la importancia de abrir la purga de aire de la caldera siempre en el arranque, porque además estos gases incondensables pueden producir corrosión en la caldera y en todo el sistema energético, por esa razón uno de los elementos más importantes de estos sistemas es el tanque de agua de alimentar, así como las purgas continuas de las calderas y las purgas periódicas de los tambores de lodo. Ver figura 1.12

Gran importancia reviste el vapor en los procesos de refinación de petróleo, por lo tanto la producción y consumo de vapor para los procesos de refinación responde a las exigencias de las calidades de la refinación del crudo. Por cuanto el vapor es inyectado a las torres con el objetivo de propiciar el despojamiento de los compuestos más ligeros de hidrocarburos, que están presentes en la materia prima o petróleo crudo. En otros casos se utiliza con el fin de provocar intercambio calórico con el propio petróleo crudo o cualquier otro producto o corte de determinadas columnas de destilación o fraccionamiento. Dicho de otro modo con el aporte calórico del vapor se logran las condiciones necesarias de temperatura para el trabajo futuro de las torres del proceso, para transporte de productos pesado, intercambio de calor, etc.

El vapor tiene características que lo convierten en el combustible, como medio de transmisión de energía térmica más utilizado internacionalmente, y entre las razones que justifican esta preferencia destacan las siguientes:

- Su alto contenido de energía por unidad de masa.
- Su capacidad de entregar energía en forma de calor a temperatura constante.
- Su limpieza y ausencia de olor.
- Su condición de recurso natural.

El vapor de agua a baja temperatura contiene 25 veces más energía que la misma masa de aire o de cualquier gas a igual temperatura, de modo que, para transportar una determinada cantidad de energía el empleo del vapor reduce en forma considerable el tamaño de la tubería conductora si se compara con cualquier otro gas. Cuando el vapor de agua es empujado para evaporar un líquido acuoso la mayor parte de la energía que entrega en ese proceso se halla contenida en el vapor secundario producido y ello permite usarlo de nuevo en otros procesos.

Por tal motivo es muy importante hacer evaluaciones periódicas en los sistemas de producción de vapor que deben conducir a la realización de proyectos de mejora organizacionales, destinados al mejoramiento de la infraestructura, a la interiorización y creación de valores en las personas para contribuir a su mejor uso, entre muchos otros.

No son pocos los estudios que se han realizado al respecto, en los que se exponen herramientas, (SGC, 2013), (Borroto Nordelo, 2006), (Monteagudo, 2006), que permiten gestionar un uso racional de los portadores energéticos, entre los que se encuentra el vapor de agua.

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

1. En la bibliografía consultada, se abordan los principios y funcionamientos de las bombas centrífugas, así como los tipos de tuberías hidráulica y diámetros recomendados en una instalación hidráulica. Con la misma, el autor de este estudio profundizó sus conocimientos para dar respuesta a la hipótesis planteada.
2. En la bibliografía consultada, se pudo conocer que con la utilización de algunas herramientas que brinda la tecnología, será posible lograr resultados que corroboren el primer objetivo trazado por este estudio.
3. A partir de la revisión bibliográfica realizada, se confirma que el problema científico declarado tiene validez; por lo que será posible dar solución al mismo, desarrollando un conjunto de herramientas facilitadoras para detectar las insuficiencias e irregularidades existentes, que limitan el buen desempeño del mismo, por lo que es factible investigar dicho problema para confirmar la hipótesis formulada.

CAPÍTULO II

Propuesta de metodología de diagnóstico para el proceso de generación de vapor.

El presente capítulo aborda una caracterización de la empresa de refinación y del área objeto de estudio. Se logra una introducción del contexto o escenario donde se aplicará la metodología de diagnóstico propuesta en este capítulo

Se exponen cada una de las fases y etapas de la metodología a desarrollar en el objeto de estudio.

2.1 Caracterización de la Unidad de Negocios, S.A., Refinería Camilo Cienfuegos.

La Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” es una de las grandes inversiones que se iniciaron en la década del 80 con la colaboración de la desaparecida Unión Soviética, comenzando su etapa de proyección, micro localización y movimiento de tierra en el período comprendido de 1977 a 1983 y su construcción y montaje de 1983 hasta 1990. En enero de 1991 se realizan las primeras pruebas con carga, obteniéndose las primeras producciones. A finales de 1993 se concluyó el oleoducto y comenzó su funcionamiento enlazándose directamente con la termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes, considerada la más eficiente del sistema electro energético nacional, llevando la frecuencia del sistema en el país. La dirección de CUPET en 1997 decide conservar las instalaciones tecnológicas e integrar a la refinería la Unidad Básica Distribuidora de Derivados del Petróleo en un proceso de redimensionamiento y no es hasta el 30 de julio de 1998 que por la resolución 133/1998 del Ministerio de Economía y Planificación se autoriza la modificación de su objeto social empresarial. Por todo esto fue la perspectiva de desarrollo de la empresa, la comercialización distribución de combustible desde el centro sur del país, como meta para alcanzar la rentabilidad. En el primer semestre del año 2005 se realizó la inspección técnica a las instalaciones de la refinería, con especialistas de CUPET y PDVSA con el objetivo de determinar el estimado del costo capital de la reactivación de la Refinería en una primera etapa con las plantas existentes. Dicho costo capital fue aprobado en el 2006, por un

valor de \$ 83 millones de USD. El valor de los activos fijos reportó 204 millones. Contrato capital de los accionistas: 51 % Comercial Cupet SA y 49 % PDVSA Cuba SA.

El 10 de abril del 2006 se constituye la Empresa PDV-CUPET, S.A. Refinería “Camilo Cienfuegos”. El 26 de Noviembre del 2007 zarpa el primer buque tanque ANDROS, desde la terminal Marino Guaraguao, en el estado de Anzoátegui de Venezuela, con el objetivo de transportar los primeros 274 000 barriles de crudo Mesa 30 y Merey 16 para ser procesados en la refinería reactivada como parte de los acuerdos del ALBA. Fue inaugurada el 21 de diciembre como colofón a la IV Cumbre de Petrocaribe con presencia del presidente de Venezuela Hugo Chávez Frías y Raúl Castro Ruz Jefe del Estado Cubano.

El 12 de diciembre de 2009, en el marco de la Comisión Intergubernamental Cuba-Venezuela fue aprobada por ambos gobiernos la transferencia de la existente empresa mixta PDV CUPET; S.A.

La denominación de la Empresa ha cambiado a raíz de la creación de la Empresa CUVENPETROL S,A, la cual tiene como misión dirigir todos los proyectos de inversión que se desarrollan en el país en el marco del ALBA (Alternativa Bolivariana para las América). La denominación oficial de la empresa actualmente es: Empresa CUVENPETROL S.A. Unidad de Negocios. Refinería de Cienfuegos. A partir de cambiar su nombre en CUVENPETROL S.A y modificar su objeto social en función de gestionar la ejecución de los proyectos estratégicos de la expansión del sistema de refinación de Cienfuegos a 150 mil barriles de crudo, la construcción de una planta de regasificación (GNL) con capacidad de producción de 2.06 MMTA, una nueva refinería en Matanzas con igual producción a Cienfuegos, expansionar el sistema de refino en Santiago de Cuba y mantener la explotación de las instalaciones actuales, aquí en Cienfuegos.

En el futuro, con la terminación y puesta en explotación de estos proyectos estratégicos la empresa CUVENPETROL S.A asumirá la meta de optimizar las sinergias de refinación y comercialización de un sistema de refino de 350 MBPD y las instalaciones de GNL con la máxima generación. La Refinería “Camilo

Cienfuegos” es la primera unidad de negocios de CUVENPETROL S.A. La misma se encuentra ubicada en la finca Carolina en la Provincia de Cienfuegos y es la única obra de su tipo construida en la Provincia.

Objeto social: Realizar las actividades de refinación de hidrocarburos y manufactura de productos.

Compra, almacenamiento, procesamiento, distribución y comercialización de hidrocarburos y productos derivados, dentro del territorio cubano y en el exterior.

Transporte de petróleo y sus derivados por la vía marítima y terrestre dentro y fuera del territorio cubano, mediante naves de su propiedad o fletadas a tal efecto.

Realizar las actividades inherentes y conexas a la operación de una refinería y aquellas que se determinan en el plan de negocios de la empresa, incluyendo la compra, enajenación, arrendamiento, usufructo, importación y exportación de bienes y servicios requeridos para el cumplimiento de su objeto social, así como concertar toda clase de contratos relacionados con éste, con un fin lícito.

Misión: Operar de forma segura y competitiva un sistema de refinación y suministro de derivados de petróleo y gas, para el mercado nacional e internacional, con un capital humano comprometido y competente, alta responsabilidad social y ambiental, contribuyendo al desarrollo de los países del ALBA.

Visión: Ser una empresa de clase mundial en el campo de la refinación de hidrocarburos y el suministro de gas, reconocida por su alto compromiso ambiental y su contribución al desarrollo sustentable de nuestros pueblos.

Valores: Ser capaz de transformar los aspectos necesarios en aras de cumplir con la Estrategia de la Organización, conservando siempre los valores y principios definidos por la misma.

Políticas:

- Orientar la actividad empresarial hacia el aseguramiento continuo de la calidad y el servicio al cliente.
- Desarrollar y utilizar indicadores para evaluar la gestión empresarial.

- Consolidar y mantener una capacidad de refinación que permita atender las necesidades del cliente.
- Desarrollar la eficiencia y la capacidad competitiva en todas las actividades, de manera que los productos sean obtenidos y suministrados al menor costo posible.
- Asegurar la fiabilidad y continuidad de los procesos mediante una adecuada gestión del mantenimiento.
- Contribuir con el desarrollo del país, en concordancia con las políticas gubernamentales y las establecidas en el Programa de Ahorro de Combustibles.
- Promover el cumplimiento de la legislación aplicable a la empresa, procurando darle el marco jurídico adecuado.
- Fomentar dentro de la empresa el ejercicio de la cultura de autocontrol como una acción cotidiana de carácter preventivo y profiláctico.
- Gestionar en forma oportuna los ajustes en los precios de ventas de los productos a efecto de cubrir los costos, gastos e inversiones empresariales.
- Promover el establecimiento de la protección Integral en todas las actividades de la empresa, la cultura de producción más limpia y de administración responsable por el cuidado del medio ambiente sobre bases de desarrollo sostenible.
- Promover la capacitación del personal en concordancia con la estrategia y objetivos de la empresa.
- Fomentar las buenas relaciones jefe – subordinado y la proporcionalidad entre los objetivos empresariales y los recursos humanos, haciendo uso de las buenas prácticas de comunicación empresarial.
- Contratar los servicios necesarios en los cuales el contratista sea más competitivo o aporte innovación tecnológica.

Alcance:

- Refinación del petróleo crudo para la obtención y comercialización de:
- Gas Licuado Regular (GLP)
- Gasolina motor RON 83 y 90 sin plomo
- Gasolina motor RON 92 sin plomo
- Combustible Diesel Regular
- Petróleo Combustible Pesado (Fuel Oil)
- Combustible JET A-1.
- Combustible Diesel Marino IFO 180 y 380.

Función fundamental: Dentro de la Unidad de Negocios de CUVENPETROL S.A, el Sector Energético tiene como función fundamental producir vapor de agua con diferentes características para garantizar el proceso de refinación, para lo cual hace uso de tres calderas, con una operando y dos de reserva.

2.2 Características del sistema de vapor de la fábrica objeto de estudio.

La casa de calderas está destinada para producir el vapor de agua a las siguientes presiones que definen las calidades de la producción:

- Con Presión de 1.3 Mpa (13 kgf/cm²) a temperatura de 225 °C.
- Con Presión de 0.6 Mpa (6 kgf/cm²), a temperatura de 210 °C.
- Con Presión de 0.3 Mpa (3 kgf/cm²), a temperatura de 200 °C.

De la casa de caldera sale el vapor de 13 kgf/cm² a los talleres que conforman el proyecto original de la Refinería. El vapor de 3 kgf/cm² se envía a la lavandería de la empresa. Para las necesidades propias del complejo de casa de calderas se consumen los vapores de 3 y 6 kgf/cm².

La capacidad máxima de la casa de caldera es de 25 t/h por unidad distribuido en cuatro unidades denominadas tecnológicamente F-52-101-1, 2, 3, A marca DE-25-14-225 GM. Cada unidad está constituida por:

Sistema de combustión, economizador, sobre calentador, tiro forzado y tiro inducido.

La ficha de proceso es la siguiente:

Ficha del proceso de Generación de Vapor de Agua.

- Nombre del proceso: Generación de Vapor de Agua de la Refinería de Cienfuegos.
- Responsable: Jefe del área Generación de Vapor de Agua.
- Objetivo del Proceso: Producir Vapor de Agua de acuerdo a las normas existentes.

2.3 Descripción del proceso a diagnosticar. Ver Anexo 1

El agua desareada y químicamente tratada desde el desareador J-52-143 es enviada mediante las bombas P-52-104-1-2-A a los economizadores E-116-1-2-3-A, donde se calienta previamente por intercambio de calor con los gases de humo hasta la temperatura de 154 °C, Posteriormente pasa a través del conducto principal de los gases de humo y se recalienta hasta la temperatura de 194 °C, donde se alcanza la producción máxima de vapor. El vapor saturado que se ha formado en los tambores de las calderas F-52-101-1-2-3-A va a los recalentadores de éstas, y se recalienta hasta 225 °C. El flujo de vapor recalentado con presión de 13 kgf/cm² y temperatura de 225 °C sale por dos conductos principales de vapor en paralelos a los consumidores. En esta línea existen otras derivaciones desde donde con el uso de válvulas estranguladoras se obtienen otras dos calidades de vapor de 6 kgf/cm² y 3 kgf/cm² y se suministra a los clientes, (MSc.Lobelles Sardiñas G. O. y MSc. Hidalgo Rodríguez L, 2010). Una parte del vapor con presión de 6 kgf/cm² y con temperatura de 210 °C se utiliza en las necesidades propias del Complejo de Casa de Calderas, a saber: Para el calentamiento del fuel-oíl utilizado en el proceso de combustión de las calderas.

Para el soplado de las boquillas de los quemadores.

Para estabilizar la presión en el desareador J-52-143 y calentar el agua hasta la temperatura de ebullición correspondiente a la presión del mismo.

Además, una parte del vapor con presión de 3 kgf/cm² y con temperatura de 200 °C se utiliza en las necesidades propias del Complejo de Casa de Calderas, a saber:

Para el calentamiento del agua químicamente tratada en el intercambiador E-52-167 hasta una temperatura de 70 °C

Para la pulverización de vapor durante la operación con el fuel-oíl a los quemadores de las calderas F-52-101-1-2-3-A.

El régimen normal de operación de las calderas se asegura por el tratamiento especial del agua de alimentación en las plantas de tratamiento químico y la regulación de la calidad del agua de caldera. Esto posibilita la obtención de un vapor limpio, ausencia de depósitos de sales e incrustaciones de escoria y evita la corrosión del metal de la caldera.

En las condiciones de explotación de las calderas se lleva a cabo la purga periódica y la purga continua. La purga periódica se efectúa 3 veces al día, una vez por turno de trabajo. El tiempo de purga no debe superar los 30 segundos, incluyendo el tiempo de apertura y cierre de las válvulas de la purga. La purga continua se debe determinar en base a los resultados de análisis químicos de contenidos de sales en el agua para calderas. El agua que se obtiene de la purga continua se dirige al separador de purga continua B-52-121, de ahí va al intercambiador de calor E-52-117 para calentar el agua químicamente tratada y aumentar la temperatura de ésta antes de entrar al desariador J-52-143, luego va al registro de purga, desde el registro de purga todas las descargas entrantes se enfrían con el agua del II sistema hasta 45 °C y se descargan a la estación de bombeo de efluentes salinos.

La purga periódica se realiza desde los puntos inferiores de tambores de las calderas F-52-101-1-2-3-A y desde los economizadores E-52-116-1-2-3-A, ésta se envía al separador de purga periódica B-52-122 para elevar la temperatura del agua químicamente tratada antes de entrar al desariador J-52-143. El agua de purga periódica desde el separador B-52-122 se vierte al registro de purga.

Donde se enfría con el agua del II sistema hasta 45 °C y se descargan a la estación de bombeo de efluentes salinos.

Variables de control del proceso de generación de vapor:

- Consumo de Fuel Oil.
- Consumo de Energía Eléctrica.
- Consumo de Agua.

Indicadores del proceso de generación de vapor:

- Índice de Consumo de Fuel Oil.
- Índice de Consumo de Energía Eléctrica.
- Índice de Consumo de Agua Tratada.
- Eficiencia Térmica del generador método directo (η).
- Eficiencia Térmica del generador método indirecto (η).
- Cantidad de CO₂ emitido al aire en el año.

2.4 Propuesta de metodología para diagnosticar el sistema de generación de vapor de la refinería.

Las organizaciones son tan eficaces y eficientes como lo son sus procesos. En tal sentido es importante sentar las bases para la simplificación y optimización de aquellos procesos que mediante la mejora de su operación, contribuyan al logro de los objetivos de la organización.

Un proceso puede ser definido como un conjunto de actividades interrelacionadas entre sí que, a partir de una o varias entradas de materiales o información, dan lugar a una o varias salidas también de materiales o información con valor añadido. En otras palabras, es la manera en la que se hacen las cosas en la organización.

El mejoramiento de un proceso se realiza con el propósito de incidir de manera significativa en la reorientación y/o mejora del mismo, hacia un mejor y más eficiente esquema de trabajo con resultados trascendentes que permitan iniciar un cambio en la forma de administrar los recursos.

Al analizar un proceso tecnológico se atienden las áreas de oportunidades vitales y las acciones de mejora que se generan a partir de este análisis, están encaminadas a modificar los métodos y procedimientos de trabajo actuales, con las que se obtendrán el mayor beneficio, al menor costo para la organización, con impactos significativos en la mejora del medio ambiente y en la seguridad de los trabajadores.

La entidad objeto de estudio define la generación y consumo de vapor de agua como uno de sus procesos logísticos, en tal sentido es objetivo del presente trabajo diseñar una metodología que permita desarrollar un adecuado diagnóstico del mencionado proceso.

El vapor es uno de los medios de transmisión de calor de mayor efectividad y fácil generación y su manejo lo ha situado en uno de los servicios más difundidos de la industria. En el sistema de generación de vapor intervienen otros procesos complementarios que forman un gran sistema, tales como proceso de preparación y suministro de agua de alimentación a las calderas.

El diagnóstico es la aplicación de un conjunto de técnicas que permite determinar el grado de eficiencia con que se produce, transporta y usa la energía en los diferentes equipos de las instalaciones técnicas.

La propuesta de la metodología para ejecutar el diagnóstico del proceso de generación de vapor de agua en la refinería de petróleo descrito en este epígrafe toma como base de referencia los aspectos teóricos acerca del desempeño de un proceso, así como, resultados de investigaciones precedentes.

La metodología, (Lobelles.S.G., 2010) plantea tres etapas, cada una con un objetivo específico, sus pasos y las técnicas a utilizar para desarrollarla. Como se presenta en la Tabla 2.1, para obtener la información se aplicaran simultáneamente y de manera combinada las técnicas referenciadas a los trabajadores seleccionados de manera aleatoria

Tabla 2.1 Etapas, pasos y técnicas de la metodología propuesta.

Etapas	Pasos	Técnicas
I. Identificación	1.1 Creación del equipo de trabajo 1.2 División del proceso en actividades 1.3 Aplicación de las técnicas de búsqueda de información.	1. Tormenta de ideas. 2. Observación 3. Entrevista 4. Trabajo de grupo 5. Revisión documental
II. Procesamiento y Análisis de la información	2.1 Trabajo en equipo de los trabajadores participantes y los investigadores seleccionados. 2.2. Detectar problemas y causas	1. Análisis documental 2. Diagrama causa-efecto 3. Diagrama de Pareto. 4. Diagrama consumo Vs producción
III. Presentación del informe del diagnóstico y toma de decisiones	3.1 Presentación del informe del diagnóstico y propuestas de alternativas de mejora.	1. Trabajo de grupo 2. Selección Ponderada 3. Propuesta de mejora

El número de expertos a trabajar como miembros del equipo es de cinco, para esto no se tuvo en cuenta los métodos estadísticos matemáticos conocidos, ya que se utilizó expertos de la propia organización y fueron invitados todos los que reunían los requisitos de conocimiento sobre el tema. Los trabajadores encuestados fueron 26 que representan el 60 % de la población.

2.4.1 Etapa I: Identificación.

Esta etapa tiene como objetivo la creación del equipo de trabajo, su preparación y obtener toda la información necesaria para la ejecución de la investigación y cumplir adecuadamente con los objetivos previstos. La base del trabajo está en dividir el proceso en actividades y a partir de ahí buscar las insuficiencias y eliminar las que no agregan valor al proceso.

La capacitación está dirigida en lo fundamental a la aplicación correcta de las técnicas de búsqueda y análisis de información así como la búsqueda de soluciones.

El proceso de instrucción se desarrolla de manera individual con cada trabajador, con una explicación detallada de los objetivos que se persiguen con el trabajo y se aclaran todas las dudas que se presenten, se presta especial atención al empleo de las herramientas seleccionadas.

A continuación se describen las herramientas y su algoritmo de aplicación.

2.4.1.1 Herramientas para el diagnóstico.

1. Tormenta de Ideas (Brainstorming)

La Lluvia de Ideas (Brainstorming) es una técnica de grupo para generar ideas originales en un ambiente relajado. Esta herramienta fue creada en el año 1941 por Osborne (Osborn, 1963), cuando su búsqueda de ideas creativas resultó en un proceso interactivo de grupo no estructurado de "lluvia de ideas" que generaba más y mejores ideas que las que los individuos podían producir trabajando de forma independiente.

Algoritmo para su utilización:

Se deberá utilizar la Lluvia de Ideas cuando exista la necesidad de:

- Liberar la creatividad de los equipos
- Generar un número extenso de ideas
- Involucrar a todos en el proceso
- Identificar oportunidades para mejorar

Cómo se utiliza:

No estructurada (flujo libre)

- Escoger a alguien para que sea el facilitador y apunte las ideas.
- Escribir en un rotafolio o en un tablero una frase que represente el problema y el asunto de discusión.
- Escribir cada idea en el menor número de palabras posible. Verificar con la persona que hizo la contribución cuando se esté repitiendo la idea. No interpretar o cambiar las ideas.

- Fomentar la creatividad. Construir sobre las ideas de otros. Los miembros del grupo de Lluvia de Ideas y el facilitador nunca deben criticar las ideas.
- Revisar la lista para verificar su comprensión.
- Eliminar las duplicaciones, problemas no importantes y aspectos no negociables. Llegar a un consenso sobre los problemas que parecen redundantes o no importantes.

Estructurada (en círculo): Tiene las mismas metas que la Lluvia de Ideas No Estructurada. La diferencia consiste en que cada miembro del equipo presenta sus ideas en un formato ordenado, Ejemplo de izquierda a derecha. No hay problema si un miembro del equipo cede su turno si no tiene una idea en ese instante.

Cómo se utiliza:

Silenciosa (lluvia de ideas escritas): Es similar a la Lluvia de Ideas, los participantes piensan las ideas pero registran en papel sus ideas en silencio. Cada participante pone su hoja en la mesa y la cambia por otra hoja de papel. Este proceso continúa por cerca de 30 minutos y permite a los participantes construir sobre las ideas de otros y evitar conflictos o intimidaciones por parte de los miembros dominantes.

2. La Observación: Es otra técnica útil que consiste en observar a las personas cuando efectúan su trabajo. Como técnica de investigación, la observación tiene amplia aceptación científica; se utiliza extensamente ésta técnica con el fin de estudiar a las personas y los procesos. Su propósito es múltiple: permite determinar qué se está haciendo, cómo se está haciendo, quién lo hace, cuándo se lleva a cabo, cuánto tiempo toma, dónde se hace y por qué se hace.

Preparación para la observación

- Determinar y definir lo que se va a observar.
- Estimar el tiempo necesario de observación.
- Obtener la autorización de la gerencia para llevar a cabo la observación.
- Explicar a las personas que van a ser observadas lo que se va a hacer y las razones para ello.

Conducción de la observación

- Familiarizarse con los componentes físicos del área inmediata de observación.
- Mientras se observa, medir el tiempo en forma periódica.
- Anotar lo que se observa lo más específicamente posible, evitando las generalidades y las descripciones vagas.
- Si se está en contacto con las personas observadas, es necesario abstenerse de hacer comentarios cualitativos o que impliquen un juicio de valores.
- Observar las reglas de cortesía y seguridad.

3. La Entrevista: La entrevista se utiliza para recabar información en forma verbal, a través de preguntas que propone el analista. Quienes responden pueden ser directivos o trabajadores, los cuales son usuarios actuales del sistema existente, usuarios potenciales del sistema propuesto o aquellos que proporcionarán datos o serán afectados por la aplicación propuesta. El analista puede entrevistar al personal en forma individual o en grupo.

Dentro de una organización, la entrevista es la técnica más significativa y productiva de que dispone el analista para recabar datos. En otras palabras, la entrevista es un intercambio de información que se efectúa cara a cara. Es un canal de comunicación entre el analista y la organización; sirve para obtener información acerca de las necesidades y la manera de satisfacerlas, así como consejo y comprensión por parte del usuario para toda idea o método nuevo. Por otra parte, la entrevista ofrece al analista una excelente oportunidad para establecer una corriente de simpatía con el personal usuario, lo cual es fundamental en el transcurso del estudio.

2.4.2 Etapa II: Procesamiento y análisis de la información

El objetivo de la etapa es el análisis de toda la información recopilada de manera tal que se puedan detectar las causas fundamentales que provocan el desvío de los indicadores del proceso, apoyado en las técnicas previstas. En esta metodología el autor del trabajo propone las siguientes herramientas generales y algunas herramientas específicas.

2.4.2.1 Herramientas generales

Este es un grupo de herramientas estadísticas que se pueden aplicar a la gestión de recursos en general. Dichas herramientas proporcionan una evaluación del problema de forma rápida y sencilla. (Samanta, 2001)

- **Diagrama Causa – Efecto o Diagrama de Ishikawa:** Esta herramienta representa de una forma ordenada todos los factores causales que pueden originar un efecto específico. Para su desarrollo deben realizarse los cinco pasos requeridos para el análisis de la causa. (Monteagudo.J.P, 2004)
 1. Definir el efecto. Este debe ser claro, preciso y medible.
 2. Identificar las causas. Mediante una tormenta de ideas con el personal que puede aportarlas.
 3. Definir las principales familias de causas. Agrupar las causas y sub-causas.
 4. Trazar el diagrama. Se traza la línea central y las que representan las causas principales.
 5. Seleccionar la causa. Concluido el diagrama se obtienen las posibles causas y mediante una selección ponderada se determinan las de mayor importancia.
- **Diagrama Consumo Vs Producción:** Permite conocer el comportamiento de ambos parámetros en el tiempo, su interrelación. Permite analizar la trazabilidad de un proceso y predecir cómo se comportará en el futuro, según las condiciones operacionales. (Sobrepera, 2006); (Bastida Lopez E., 2007)

2.4.3 Etapa III: Presentación del diagnóstico y propuesta de mejora

En esta etapa, una vez detectadas las causas que provocan las fallas en el sistema de generación de vapor, mediante la técnica de votación ponderada se procede a la determinación de la causa fundamental que genera dicha ineficiencia y sobre ella se podrán generar varias alternativas de solución que puedan contribuir a la mejora del funcionamiento del proceso.

El objetivo de esta etapa es permitir que el equipo de trabajo, una vez concluido el diagnóstico lo presente ante la dirección del área y lo discuta con los trabajadores, técnicos y todo el personal involucrado en el proceso a fin de conocer y evaluar posibles decisiones que tributen de forma más directa a minimizar las afectaciones al proceso productivo de refinación, por fallas en el suministro de vapor. Para esto se tomará como base fundamental los conocimientos y experiencias de operadores y especialistas, siempre teniendo en cuenta la filosofía del Mejoramiento Continuo.

A continuación se explica el procedimiento para aplicar la técnica de selección ponderada.

2.4.3.1 Selección Ponderada (Multivoting)

La Selección Ponderada es una herramienta utilizada para la toma de decisión en base a factores cualitativos o a múltiples factores no homogéneos que intervienen en un suceso.

Algoritmo.

Paso 1: Listar el conjunto de factores sobre el que ha de tomarse la decisión.

- Escribir a la vista de todos los participantes la decisión a tomar.
- Listar todos los factores o hechos entre los que se quiere encontrar un factor o conjunto de factores prioritarios, atendiendo a la decisión a tomar.

Paso 2: Identificar el criterio de priorización o selección.

- Definir el criterio básico que todos los participantes deben utilizar para evaluar cada factor.

- Escribir el criterio a la vista de todos los participantes

Paso 3: Definir el sistema de puntuación a utilizar.

Se tendrán en cuenta dos aspectos:

- Número de factores a puntuar del total
- Puntos a dar a cada factor
- Priorización simple: Se evalúan correlativamente desde el 1 al número de factores a puntuar

- Priorización destacada: Se evalúan de forma no correlativa los diferentes factores para destacar los más valorados

Paso 4: Puntuar los factores de forma personal.

- Cada participante debe evaluar de forma personal, sin conocer las puntuaciones del resto del grupo.

Paso 5: Construir la tabla de puntuación e incluir las puntuaciones personales.

- Dibujar la tabla de puntuación a la vista de todos los participantes.
- Incluir las puntuaciones de cada participante.

Paso 6: Determinar los valores cuantitativos para la toma de decisión.

- Sumar las puntuaciones otorgadas a cada factor (casilla suma).
- Obtener el número de personas que ha puntuado a cada factor (casilla frecuencia puntuación)

Paso 7: Determinar el orden de prioridad.

- Criterio principal: El factor más importante es el que obtiene una puntuación más alta.
- Criterio secundario: En caso de que dos factores obtengan igual puntuación, el factor más importante es el que haya sido puntuado por más participantes (frecuencia de puntuación mayor).

Posibles problemas y deficiencias en la interpretación:

Las herramientas de selección proporcionan pautas para tomar decisiones. La bondad de dichas decisiones dependerá de la capacidad de valoración de los componentes del grupo y del seguimiento de la metodología propuesta.

1. La priorización o selección no será adecuada cuando los componentes del grupo no dispongan de la información necesaria para evaluar los factores o priorizar según el criterio seleccionado.
2. Así mismo, la priorización o selección estará sesgada cuando alguno de los componentes del grupo evalúe los factores atendiendo a criterios diferentes de los seleccionados.

Finalmente el equipo de trabajo presentará el informe del diagnóstico a la gerencia de la refinería de petróleo, y este deberá ser discutido y aprobado por todos los trabajadores, con el fin de que todos sean partícipes en la búsqueda de soluciones al problema identificado.

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

1. La metodología de diagnóstico diseñada en el segundo capítulo es viable para los procesos de generación de vapor.
2. El diagnóstico realizado al proceso de generación de vapor demostró la ineficiencia en el suministro de agua de alimentación a las calderas.
3. La metodología diseñada en este capítulo, permite desarrollar un adecuado diagnóstico, donde se detectan las causas que provocan las fallas en el sistema de generación de vapor y con la aplicación de herramientas como causa efecto y la técnica de votación ponderada, se determina la causa fundamental que genera dicha ineficiencia y sobre ella se aplican varias alternativas de solución que puedan contribuir a la mejora del funcionamiento del proceso.

CAPÍTULO III

Capítulo III: Análisis de los resultados y evaluación de la propuesta de mejora.

En el presente capítulo se presenta el desarrollo del diagnóstico realizado al sistema de generación, donde se identificaron las causas fundamentales que provocaron las fallas en el suministro de vapor al proceso de refinación. Finalmente se realiza una evaluación de la propuesta de mejora presentada, lo que resultó una solución acertada que contribuyó a la reducción de las fallas mencionadas.

3.1 Diagnóstico del proceso de generación de vapor de agua.

El proceso de generación de vapor de agua dentro del proceso de refinación de petróleo, como se describió en el capítulo anterior desempeña un papel fundamental en el logro de los objetivos del esquema tecnológico de la organización; en tal sentido es importante encontrar reservas que permitan su mejoramiento continuo. Para ello se realiza un diagnóstico general del proceso que incluye un conjunto de herramientas que facilitan detectar aquellas insuficiencias e irregularidades que existen en el proceso que limitan su buen desempeño.

Para la realización del diagnóstico el autor de este trabajo dedicó un período de su tiempo a su preparación in situ para enfrentar la tarea, lo cual consistió en conocer detalladamente el proceso, los parámetros de diseño, estándares y su funcionamiento real.

Para comenzar el estudio sobre la generación de vapor de agua en la refinería de petróleo, primero se realizó una reunión con el Consejo de Dirección de la empresa y del sector energético por ser el área responsable de la generación de vapor, para explicarles los objetivos del estudio a realizar y recabar del gerente su autorización para el desarrollo del mismo y el acceso a la información. Además se

explicó la metodología diseñada para realizar el diagnóstico, cuya propuesta fue aprobada como documento rector del mismo. De esta reunión salió como acuerdo participar en una reunión de producción con todos los trabajadores, donde se les explicaría la necesidad del estudio, los objetivos que se persiguen, importancia del trabajo, necesidad de cooperación y participación de todos. A propuesta de la gerencia se seleccionaron dos trabajadores por brigada, que junto al autor del trabajo conformarían el equipo de investigación.

Como fue descrita en el capítulo anterior la metodología de diagnóstico diseñada comprende tres etapas para su ejecución, por lo que a continuación se describen las diferentes etapas, los pasos y principales técnicas aplicadas en cada una de ellas.

3.1.1 Primera etapa: Identificación.

Tormenta de ideas: Como acuerdo de la reunión con el Consejo de Dirección, la reunión de producción con todos los trabajadores se realizó el día martes 7 de febrero de 2014, donde se informó que el estudio se prolongaba por 25 días y en ella después de la rendición del informe de producción y su respectivo análisis, se llevó a cabo la tormenta o lluvia de ideas referidas al proceso de generación de vapor del agua, en esta tormenta participaron 36 trabajadores que representan el 84 % del total.

Como resultado de esta técnica se recogen un grupo de ideas que son valoradas por el equipo de investigación, se seleccionan las más viables y se incorporan al cuerpo del informe final del diagnóstico. **Ver Anexo 2**

Observación: El período de observación fue acotado por el equipo de investigación para 21 días y en la reunión antes mencionada se explicó cómo se desarrollaría esa técnica y se estableció una guía de observación que aparece en el **Anexo 3**.

Como resultado de esta técnica se pudo identificar los diferentes sistemas y equipos que componen el proceso de generación de vapor, así como las principales deficiencias que presenta, en el siguiente listado se muestran los resultados:

1. Sistema de preparación de agua de alimentación
2. Sistema de suministro del agua técnica de alimentación
3. Sistema de recolección de condensados
4. Sistema de purgas continuas y periódicas
5. Sistema de eliminación de oxígeno del agua técnica
6. Sistema de bombeo general
7. Sistema de preparación y suministro de aditivos (Vapen)

Como resultado de esta técnica se detectaron además varios problemas o deficiencias que son reflejadas en el cuerpo de informe final del diagnóstico.

Entrevista: Para la realización de esta técnica se elaboró un modelo de entrevista que aparece reflejado en el **Anexo 4**, la misma se desarrolló de forma verbal y se hizo una selección aleatoria del personal que sería entrevistado, a cada uno individualmente se le explicaron los objetivos de la misma y la necesidad de la veracidad de la información. Para la selección se tuvo en cuenta que ese personal tuviera una relación con el proceso tecnológico para garantizar la calidad de las respuestas.

Como resultado de la aplicación de esta técnica se pudo conocer un grupo de valores positivos que demuestran la eficiencia del proceso de la fábrica, pero también un grupo de deficiencias que inciden en las paradas de la planta de generación de vapor y por consiguiente impiden que la fábrica sea más eficiente. Después de recogida toda la información por las técnicas antes señaladas el equipo de investigación se dedicó al análisis de los mismos para tener una clara visión de los principales problemas detectados y poder proponer alguna medida que contribuya a la solución de los mismos. Para este análisis se desarrolló la segunda etapa de la metodología propuesta.

3.1.2 Segunda etapa: Análisis de la información.

Con la información recogida en la etapa anterior y la búsqueda de datos estadísticos de la empresa, se realiza un profundo análisis del proceso, que debe conducir a la mejor toma de decisiones. En la metodología propuesta se relacionan varias herramientas generales y el resultado de su aplicación se presenta a continuación:

Diagrama de Ishikawa o Causa-efecto: Para la búsqueda de los causales fundamentales que inciden en las deficiencias técnicas del sistema de generación de vapor se construye el diagrama de Ishikawa o Causa-efecto según se muestra en la **figura 3.1**

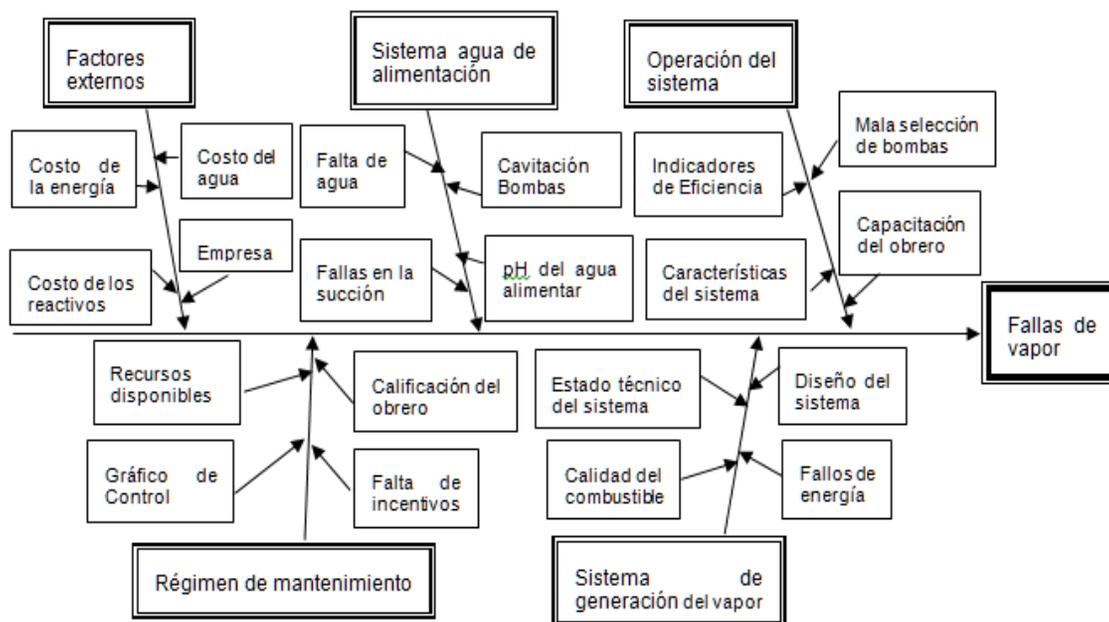


Figura 3.1 Diagrama Causa Efecto del proceso de generación de vapor.

En el desarrollo de esta herramienta aparecen reflejadas las causas que provocan las reiteradas paradas y fallas en el suministro de vapor de agua. Sin embargo las causas “Factores externos” con sus sub-causas no deben incidir decididamente en el consumo y menos aún serán efectivas las medidas correctivas que sobre ellas se tomen, por cuanto son cuestiones ajenas a la empresa, que si bien es cierto encarecen el proceso de producción del vapor, también es cierto que no hay posibilidades de actuación sobre ellas para mitigar su efecto negativo. La causa “Régimen de mantenimiento” puede tener determinado impacto sobre las paradas y el tiempo perdido por concepto de débil mantenimiento por falta de recursos o por mala capacitación del hombre, sin embargo se ha podido comprobar durante el período de la observación que no es precisamente una causa de mayor peso, por cuanto los mantenimientos tienen un adecuado control tecnológico y una alta prioridad por parte de la gerencia, por tanto los recursos no son un problema.

Resta entonces centrar el análisis y las acciones en las tres causas restantes y sus respectivas sub-causas. Para lo cual se aplicarán las técnicas de la metodología de diagnóstico descritas en el capítulo anterior. Con ellas se podrá realizar un adecuado análisis y para buscar posibles vías de solución se hace necesario conocer el comportamiento de dicho proceso por sistemas y equipos a fin de identificar las causas de mayor peso.

El agua como materia prima para uso tecnológico en la generación de vapor, se suaviza en la planta de tratamiento, siendo suministrada a las calderas para la generación de vapor a través de las bombas centrífugas P-52-104. Se conoce que la calidad y cantidad de agua de alimentación definen la producción de vapor.

En la siguiente tabla se puede apreciar la relación estrecha existente entre el consumo de agua y la producción de vapor, así como su incidencia en el consumo de combustible. Se debe destacar que esta situación se mantuvo en el primer trimestre del presente año.

Tabla 3.1 Comportamiento del consumo de agua, consumo de fuel-oíl y la cantidad de vapor generado en cada trimestre del año 2013.

Año	Mes	Trimestre	Producción vapor (t/mes)	Consumo Total de Fuel-oíl + Fuel-oíl equivalente, (m³)	Índice/consumo	Consumo de Agua (m³)	Índice de Consumo de Agua
	Enero						
	Febrero		29970	2646,012	0,09	87398	2,92
	Marzo	Trimestre I	29970	2646,012	0,09	87398	2,92
	Abril	Trimestre I					
	Mayo	Trimestre I	32165	2459,112	0,08	84638	2,63
2013	Junio	Trimestre II	32165	2459,112	0,08	84638	2,63
2013	Julio	Trimestre II					
2013	Agosto	Trimestre II	33340,1	2641,546	0,08	87484	2,62
2013	Septiembre	Trimestre III	33340,1	2641,546	0,08	87484	2,62
2013	Octubre	Trimestre III					
2013	Noviembre	Trimestre III	30328,7	2370,024	0,08	68757	2,27
2013	Diciembre	Trimestre IV	30328,7	2370,024	0,08	68757	2,27
2013		Trimestre IV	30328,7	2370,024	0,08	68757	2,27

2013
2013
2013
2013
2013

En la tabla 3.1 y en la figura 3.2 se presenta el comportamiento del consumo de agua y de fuel oil respecto a la cantidad de vapor generado en cada trimestre del año 2013 y se observa como el consumo de fuel no es representativo comparado con el del agua. En primer lugar, porque el crudo es sustituido por gas de refinación, por lo que en este sentido los costos disminuyen y el costo del agua es alto aparejado a su consumo.

A su vez la figura 3.2 muestra la variación simultánea del consumo de los portadores agua y fuel-oíl con la generación de vapor realizada en el tiempo, donde un incremento de la generación da lugar a un incremento de los consumos de estos, pero donde el agua tiene la mayor incidencia.

Es evidente entonces, que las fallas en este sistema van a repercutir en la generación de vapor. Por consiguiente, las propuestas de mejoras deben encaminarse al perfeccionamiento de la operación del sistema de agua de alimentación en su conjunto.

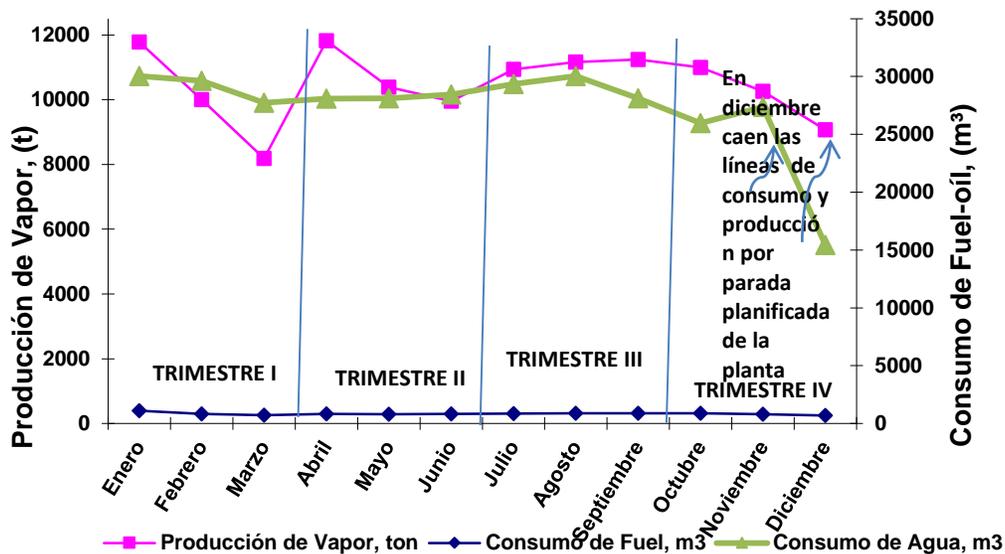


Figura 3.2 Gráfico de Consumo Vs Producción.

Del gráfico mostrado se deduce que existe una alta correspondencia, entre el agua y el vapor: un aumento de la producción de vapor trae aparejado un aumento del consumo de agua tratada y viceversa. Entonces una falla técnica en el sistema de alimentación provocaría inevitablemente fallas en la producción de vapor. Sin embargo por las ideas aportadas durante la tormenta de ideas y por lo observado

en el diagnóstico se ha podido comprobar que sobre el sistema de agua de alimentación recaen las mayores fallas.

Al comenzar el análisis por el 1er trimestre del año 2013 se puede observar que se produce una reducción apreciable de la producción de vapor, sin embargo los consumos de agua mantienen aproximadamente el mismo nivel, esto se explica por la puesta en marcha de dos plantas del proceso de refinación a inicios del año, sin que este consumo adicional de agua se corresponda con el proceso de generación de vapor.

En la segunda mitad del año se observan incrementos considerables en el consumo de agua cuando la producción de vapor apenas ha crecido, por lo que resulta fácil comprender que no se corresponden esos niveles de consumo, es evidente que se manifiestan consumos no asociados a la producción que están deteriorando los índices de eficiencia. Se pudo conocer que en ese período se realizaron fuertes trabajos de limpieza y tratamiento en la planta de tratamiento químico que provocaron esos consumos de agua sin que hubiese relación con la producción. Pero al analizar el 3er trimestre del año la razón entre estas variables se hace menos correlacionada, o sea no se justifican los picos evidenciados en el consumo de agua, obsérvese que en la primera mitad del trimestre hubo un decrecimiento muy marcado de la producción (la planta de reformación catalítica fuera de operaciones por roturas), mientras se mantenía inmovible el nivel de consumo de agua. En el análisis del 4to trimestre del año se puede observar que la producción de vapor va disminuyendo, así como en el consumo de agua, sin que por eso se aprecie una buena correlación de ambos parámetros, y finalmente tanto el consumo como la producción disminuyen considerablemente debido a la parada planificada por mantenimiento de las plantas de proceso.

3.1.3 Tercera etapa: Presentación del informe y Toma de decisiones.

Con todas las condiciones creadas se realizó el referido diagnóstico y después de aplicar los diferentes instrumentos, el equipo investigador analizó la información recogida en los mismos y rindió un informe a la gerencia de la empresa, los resultados se resumen a continuación:

- Mediante la observación se detectaron varios salideros de vapor de agua sin que estos sean contabilizados.
- Por la observación se pudo detectar además los sobrecalentadores de las calderas eslovacas están en mal estado técnico.
- No trabaja la planta de recuperación de condensados, esto representa un consumo constante de agua fresca.
- Por el grupo de especialistas se pudo comprobar que las bombas del sistema de alimentación P-52-104, se disparan como consecuencia de fallas en el flujo de agua en la succión. Cavitaron las bombas de alimentación.
- Los trabajadores no tienen conocimiento de indicadores de eficiencia que relacionen el consumo de vapor con la producción.
- Cambiar líneas de descarga de vapor al silenciador desde la línea 41/2 y 41/3 la existente es de diámetro 80 situada por una de diámetro 150.
- No se puede controlar desde el panel el cierre de las válvulas de salida en las líneas de vapor que van para el área de Tanques y Muelle.
- En el área de generación se realizaron trabajos de cambios en los cabezales de succión de las bombas de alimentación.
- No se conoce de incentivos que propicien un uso racional del vapor, como en el caso de la emulación referida a los ahorros energéticos.
- Se necesitan más operadores para la recirculación del agua al deareador, o sea existe poca cobertura operacional en ese sistema
- La insulación de las calderas no es buena y provoca pérdidas de calor
- No existen flujómetros en todas las áreas del proceso, lo que impide tener una clara visión de todo el vapor de agua consumido por cada subproceso.
- No existe un método de limpieza exterior de los tubos en las calderas eslovacas. No tienen montado sopladores de hollín.

Las entrevistas arrojaron las siguientes deficiencias:

- Los indicadores que miden la eficiencia y eficacia del proceso no están identificados y no son del conocimiento de los trabajadores, no pudiéndose encontrar evidencias de su medición.
- Por consultas con los operadores se supo que persisten malos hábitos en el consumo del vapor, y no se controla por la administración.
- El control del pH del agua de alimentar refleja una buena preparación del agua técnica.
- La calificación y capacitación de los trabajadores y operarios es adecuada, sin embargo dentro de los planes de capacitación no se recoge el tema del uso racional del vapor y eso influye directamente en que no puedan asimilar nuevas formas de gestionar el uso del vapor.
- El sistema de alimentación ha provocado paradas de las calderas por fallas de agua de alimentar. Se deduce que las características del sistema no son las adecuadas.
- El estado técnico del sistema en general tiene numerosas deficiencias y no existe un buen programa de mantenimiento.
- Se comprobó que no existe un documento que explique de manera general el proceso y su funcionamiento.
- Algunos subprocesos no están explícitamente documentados por lo que existen operaciones que se realizan de manera empírica.

Del total de deficiencias detectadas se realiza un detallado análisis para definir las de mayor impacto para la producción, por lo que se considera realizar una reducción de las causas a fin de aplicar la votación ponderada para determinar sobre cuales se debe trabajar con vistas a reducir las paradas por fallas en la generación de vapor de agua. El listado de causas seleccionadas se presenta a continuación:

Listado de los principales problemas detectados mediante la combinación de las diferentes técnicas.

1. El caudal de agua de alimentar en la succión de la bomba no es suficiente. Provocando la cavitación de la bomba.
2. Los sobrecalentadores de las calderas eslovacas están en mal estado técnico.
3. Las características del sistema de alimentación a la succión de la bomba no son adecuadas.
4. No tienen montado sopladores de hollín.
5. Sistema de mantenimiento preventivo del proceso poco efectivo.
6. Poca cobertura operacional respecto a la recirculación de agua al deareador
7. No están bien definidos los indicadores de eficiencia y eficacia del uso del vapor.
8. No existe criterio de uso y reúso del vapor en la empresa.
9. No existen incentivos que motiven al personal para el uso eficiente del vapor de agua.
10. La insulación de las calderas no es buena y provoca pérdidas de calor

Una vez conocidos los principales problemas causales de las reiteradas fallas de vapor para el proceso, se necesita determinar cuáles de aquellos representan los de mayor impacto, para de esta forma establecer una estrategia de posibles soluciones, que permitan además identificar y proponer medidas de mejoras para el proceso.

Con la técnica de votación ponderada que se muestra en la **Tabla 3.2**, se pueden establecer prioridades en el tratamiento posterior de las causas más relevantes. Para el desarrollo de esta técnica se realizó la votación de forma individual y secreta, asignándosele valores del 1 al 5 a aquellas causas que presentan mayor importancia, siempre dándole la mayor puntuación de 5 puntos a la que se estime tenga la mayor incidencia y de forma decreciente al resto por orden de prioridades. Para la selección final se sumaron las puntuaciones y se organizaron en orden

decreciente, en el caso que hubo empate se definió por la cantidad de veces que se puntuó por los especialistas.

Tabla 3.2 Votación Ponderada.

	Principales problemas causales de las fallas de vapor de agua									
Participantes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Votante 1	5		4		2	3		1		
Votante 2	5			2		4		3		1
Votante 3	4	3	5			2			1	
Votante 4	4	2	5		1	3				
Votante 5	5		4		2	3	1			
Suma	23	5	18	2	5	16	1	4	1	1
Frecuencia de puntuación	5	2	4	1	3	5	1	2	1	1
Orden de prioridad	1	5	2	7	4	3	8	6	9	10

Como puede observarse en la **tabla 3.2**, las causas 1, 3 y 6 recibieron las puntuaciones más elevadas, por ese orden, le siguen las causas 2 y 5, pero la causa 5 fue puntuada más veces, el resto de las causas presentan menor puntuación y totales, por consiguiente la selección se plantea según el orden siguiente:

Según los resultados que se muestran en la tabla anterior los problemas prioritarios a tratar son:

1. El caudal de agua de alimentar en la succión de la bomba no es suficiente. Provocando la cavitación de la bomba.
2. Las características del sistema de alimentación a la succión de la bomba no son adecuadas.

3. Poca cobertura operacional respecto a la recirculación de agua al deareador
4. Los sobrecalentadores de las calderas eslovacas están en mal estado técnico.
5. Sistema de mantenimiento preventivo del proceso poco efectivo.

3.1.4 Presentación de la propuesta de mejora.

En el proyecto original Ruso el cabezal succión de las bombas P-104-1, 2 y A tenían un diámetro de 250 mm y succionaban de este de 0.5 a 1.00 metro, pero en la etapa de reactivación del área de caldera del año 2008, se cambiaron las bombas rusas por bombas alemanas de iguales características a la del proyecto. Además, se cambió el cabezal de succión original de proyecto por uno de 100 mm y la succión de las bombas, que tenía un largo de 150 metros, se llevó a 100 metros, con varios codos hasta llegar a la succión de las bombas.

A partir del cambio efectuado cuando aumenta la demanda de agua de alimentación superior a 36 m³/h, debido a la entrada en operación de una segunda caldera, las bombas cavitan y se cae la presión de descarga por debajo de 19.5 kgf/cm², lo que provoca varias paradas de las calderas y por consiguiente fallas en el proceso de refinación por déficit de vapor.



Imagen 3.3 Vista lateral de las bombas que suministran el agua de alimentación a las calderas de la refinería “Camilo Cienfuegos”.

Por otra parte, la práctica operacional ha demostrado que el personal de operación en el momento que está arrancando una segunda caldera, se necesitan dos operadores, pues existe poca cobertura operacional respecto a la recirculación de agua al deareador, así como poca cobertura operacional para el arranque de la bomba de reserva.

A continuación se muestran los datos técnicos de la bomba instalada.

3.2 Datos técnicos de las Bombas P-52-104.

Las bombas centrifugas horizontales P-52-104 en el área objeto de estudio, están destinadas para garantizar el caudal necesario de agua a las calderas que producen la cantidad de vapor que exigen los diferentes procesos de refinación de la refinería “Camilo Cienfuegos”.

HOJA DE DATOS - BOMBA HORIZONTAL

Tipo: Bomba Centrifuga Horizontal, multi-etapa, succión simple horizontal de descarga vertical.

Modelo: Multitec

Tabla 3.3 Parámetros de la Bomba Centrifuga Horizontal P-52-104.

PARÁMETROS	UM	VALORES
<i>Líquido Bombeado</i>		AGUA
<i>Peso específico</i>	<i>kgf/m³</i>	954,2
<i>Caudal nominal</i>	<i>m³/h</i>	72,0
<i>Presión Succión</i>	<i>kgf/cm²</i>	1,87
<i>Presión diferencial</i>	<i>kgf/cm²</i>	20,43
<i>NPSH requerido</i>	<i>m</i>	2,00
<i>Velocidad nominal</i>	<i>rpm</i>	1750
<i>Potencia Consumida</i>	<i>HP</i>	75,7
<i>Caudal mínimo continuo</i>	<i>m³/h</i>	28,0
<i>Temperatura</i>	<i>°C</i>	104
<i>Viscosidad</i>	<i>CP</i>	0,277
<i>AMT</i>	<i>m</i>	210,00
<i>Presión Descarga</i>	<i>kgf/cm²</i>	22,3
<i>AMT Shutoff</i>		252,0
<i>Eficiencia</i>	<i>%</i>	74
<i>Potencia Motor</i>	<i>H</i>	100

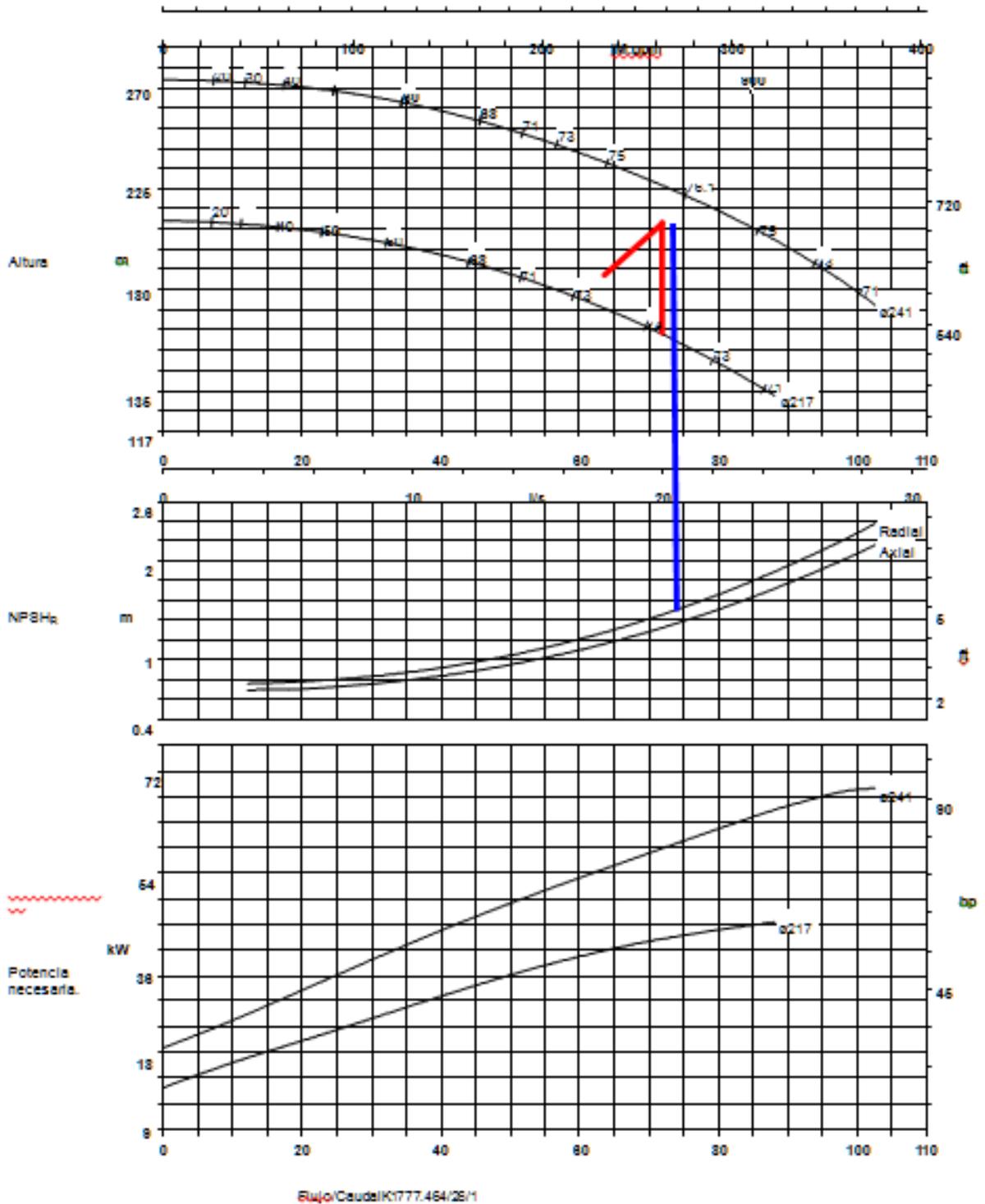


Figura 3.4 Curvas características de la bomba de agua de alimentación para calderas

3.3 Cálculo de la línea de succión de la bomba de agua de alimentar

A continuación se presenta el cálculo de la línea de succión de la bomba de agua de alimentar en las condiciones actuales, que provoca las fallas antes descritas y que conllevaron a realizar este estudio.

3.3.1 Cálculo de la línea de succión de la bomba de agua de alimentar en condiciones anteriores al estudio.

El Anexo N° 5 de este trabajo muestra el isométrico de la bomba P-52-104 de agua de alimentación en las condiciones anteriores al estudio.

-Cálculo del flujo para la succión de la bomba P-105-04 de las líneas de agua alimentar de entradas a las calderas

Datos.

$$Q = 72 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$D_i = 104 \text{ mm}$$

$$P_v \text{ a } 104 \text{ }^\circ\text{C} = 1.19 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{NPSHD} = \text{HP} + \text{HZ} - \text{HF} - \text{Ht}_v$$

$$\text{Altura del desareador} = 8 \text{ m}$$

$$\text{NPSHr} = 2 \text{ m}$$

Accesorios.

10 Codos 90°WPS STD, Ø 100 mm

2 Válvulas A-216- C Ø, 100 mm

2 Codo 45° WPS STD, Ø 100 mm

2 Te, Ø 100 mm

1 Salida de tanque, Ø 100 mm

1 Entrada a la bomba, Ø 100 mm

Longitud, 108 m

-Cálculo de la velocidad por la tubería.

$$A \cdot V = Q$$

$$Q = V \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}$$

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_i^2}$$

$$V = \frac{4 \cdot 72 \text{ m}^3 / \text{h}}{3600 \cdot 3.1416 \cdot 0.104^2}$$

$$V = 2.3 \text{ m/s}$$

Nota: se tiene en cuenta que: 1 hora representa 3600 segundos.

-Cálculo del HP, altura debido a la presión:

$$HP = \frac{P_{abs}}{\rho \cdot g}$$

$$HP = \frac{1,2 \cdot 9,8 \cdot 10^4}{954,2 \cdot 9,8}$$

$$HP = 12,57 \text{ m}$$

-Cálculo del HZ, altura del líquido a la bomba:

HZ es positiva porque está el agua por encima de la bomba

$$HZ = 8 \text{ m}$$

-Cálculo del Hf, pérdidas friccionales:

$$H_f = F \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} + \left(\sum \frac{K \cdot V^2}{2 \cdot g} \right)$$

K- coeficiente de perdidas locales

F- coeficiente de fricción

Accesorios.

10 Codos 90° WPS STD, Ø 100 mm

2 Válvulas A-216- C Ø, 100 mm

2 Codo 45° WPS STD, Ø 100 mm

2 Te, Ø 100 mm

1 Salida de tanque, Ø 100 mm

1 Entrada a la bomba, Ø 100 mm

Longitud, 108 m

Tramo recto, (tr);

Tubo de acero con rugosidad; $\xi = 0.0046 \text{ cm}$

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\xi}{D_i} = \frac{0.0046}{10.4} = 0,00044$$

$$N_R = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{2.3 \cdot 0.104}{0.26 \cdot 10^{-6}} = 0.92 \cdot 10^6 = 9.2 \cdot 10^5$$

Con N_R , la rugosidad relativa $\left(\frac{\xi}{D_i}\right)$, se entra en el gráfico de Moody, donde el coeficiente de fricción, $F = 0.017$, entonces:

$$H_{f_{tr}} = 0.017 \cdot \frac{108}{0.104} \cdot \frac{2.3^2}{2 \cdot (9.8)}$$

$$H_{f_{tr}} = 4,76 \text{ m}$$

-Cálculo del Hf, pérdidas locales (accesorios):

$$H_{f_{acc}} = \Sigma K * \frac{V^2}{2 \cdot g} = (2 K_v + 10 K_{c90^\circ} + 2 K_{T_e} + 1 K_{s_{alida}} + 2 K_{c45^\circ} + 1 K_{e_{ntrada}}) * \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

K_v – coeficiente de las válvulas,

K_{c90° – coeficiente de los codos de 90 °,

$K_{T_{entrada}}$ – coeficiente de las uniones en T de entrada,

$K_{s_{alida}}$ – coeficiente de salida de tanque,

K_{c45° – coeficiente de los codos de 45 °,

$K_{e_{ntrada}}$ – coeficiente de entrada a la bomba.

Entonces:

$$H_{f_{acc}} = (2 (0.15) + 10 (1) + 2 (1) + 1(0.5) + 2 (0.11) + 1 (0.5)) * \frac{2.3^2}{2 \cdot 9.8}$$

$$H_{f_{acc}} = 3.65 \text{ m}$$

-Cálculo Total de las pérdidas:

$$H_{f_T} = H_{f_{tr}} + H_{f_{acc}}$$

$$H_{f_T} = 4,76 + 3.65$$

$$H_{f_T} = 8,41 \text{ m}$$

-Cálculo del H_{t_v}, carga debida a la tensión de vapor:

$$H_{t_v} = \frac{P_{abs}}{\rho_{liq} \cdot g}$$

$$H_{t_v} = \frac{1.19 \cdot 9.8 \cdot 10^4}{954.2 \cdot 9.8},$$

Donde el valor de la presión de vapor se obtuvo de software *Chemical Logic Steam Tab Companion*

$$H_{t_v} = 12.47 \text{ m}$$

-Cálculo del Hv, carga debida a la velocidad en la tubería de succión:

$$H_v = \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$H_v = \frac{2.3^2}{2 \cdot 9.8}$$

$$H_v = 0.27 \text{ m}$$

-Cálculo de la altura neta de entrada disponible, NPSHd total:

$$NPSH_d = H_P + H_Z - H_{f_T} - H_{TV} - H_v;$$

$$NPSH_d = 12.57 + 8 - 8.41 - 12.47 - 0.27$$

$$NPSH_d = -0.58 \text{ m} \leq NPSH_r = 2 \text{ m}$$

El resultado de este cálculo indica que el NPSHd es menor que el requerido por la bomba, lo que demuestra, que estas condiciones provocan la cavitación y son la causa de las fallas de vapor producidas en las plantas de proceso. Esta explicación corrobora lo planteado en el epígrafe 1.3 de este estudio, ya que (Viejo, Z. M, 2003), recomienda que se debe evitar que la carga neta disponible sea menor a la recomendada, para que no se origine la aparición de este fenómeno. Además asegura que cuando la carga neta positiva de succión disponible NPSHd es insuficiente, tiene como consecuencias problemas severos de operación. En este caso de estudio se demuestra que la carga neta positiva de succión disponible NPSHd es insuficiente y las fallas de vapor encuentran su causa en el propio montaje del sistema. Esto motiva, que al arrancar la segunda caldera la bomba cavitaba por no ser suficiente el flujo de agua.

Por tal motivo con este estudio y análisis de cálculos, se propone cambiar el diámetro de la tubería de succión por una de mayor diámetro, lo que traería consigo la alimentación suficiente en la succión de la bomba.

3.3.2 Cálculo de la línea de succión de la bomba de agua de alimentar que da respuesta a la propuesta de mejora.

A continuación se presenta el nuevo cálculo que da respuesta a la propuesta de mejora para el sistema de agua de alimentación en el área de generación de vapor, desarrollado por la metodología antes descrita.

Cálculo de la tubería nueva:

Datos

$$Q=72 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$P_v \text{ a } 104 \text{ }^\circ\text{C} = 1.19 \text{ kgf/cm}^2$$

$$D_{i1} = 250 \text{ mm}$$

$$D_{i2} = 150 \text{ mm}$$

$$\text{NPSH}_r=2 \text{ m}$$

Accesorios

Tubería = A-106 SCH STD Ø 250 mm

1 Válvulas A-216- C, Ø 150 mm

5 Codos 90°WPS STD, Ø 250 mm

2 Codos 45° WPS STD, Ø 150 mm

1 Te, Ø 250 mm

1 Te, Ø 150 mm

1 Entrada Ø 150 mm

-Cálculo la velocidad por la tubería.

$$A \cdot V=Q$$

$$Q= V \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}$$

$$V= \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_i^2}$$

Para Ø 250 mm

$$V= \frac{4 \cdot 72 \text{ m}^3/\text{h}}{3600 \cdot 3.1416 \cdot 0.250^2}$$

$$V = 0.407 \text{ m/s}$$

Para Ø 150 mm

$$V= \frac{4 \cdot 72 \text{ m}^3/\text{h}}{3600 \cdot 3.1416 \cdot 0.150^2}$$

$$V = 1.13 \text{ m/s}$$

nota: se escribe 3600 para llevar de hora a segundo.

-Cálculo del HP, altura debido a la presión:

$$\text{HP}= \frac{P_{abs}}{\rho \cdot g}$$

$$\text{HP}= \frac{1,2 \cdot 9.8 \cdot 10^4}{954,2 \cdot 9.8}$$

$$\text{HP}= 12,57 \text{ m}$$

-Cálculo del HZ, altura del líquido a la bomba:

HZ es positiva porque esta el agua por encima de la bomba

$$HZ=8 \text{ m}$$

-Cálculo del Hf, pérdidas friccionales:

$$H_f = F \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} + \left(\sum \frac{K \cdot V^2}{2 \cdot g} \right)$$

K- coeficiente de perdidas locales

F- coeficiente de fricción

Tubería = A-106 SCH STD Ø 250 mm

1 Válvulas A-216- C, Ø 150 mm

5 Codos 90°WPS STD, Ø 250 mm

2 Codos 45° WPS STD, Ø 150 mm

1 Te, Ø 250 mm

1 Te, Ø 150 mm

1 Entrada, Ø 150 mm

1 Salida, Ø 250 mm

Longitud, 59 m

- Cálculo de Hf de la tubería con Ø 250 mm;

Tramo recto, (tr);

Tubo de acero con rugosidad; $\xi = 0.0046 \text{ cm}$

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\xi}{D_i} = \frac{0.0046}{25} = 0,00018$$

$$N_R = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{0.407 \cdot 0.25}{0.26 \cdot 10^{-6}} = 0.39 \cdot 10^6 = 3.9 \cdot 10^5$$

Con N_R , la rugosidad relativa $\left(\frac{\xi}{D_i}\right)$, se entra en el gráfico de Moody, donde el coeficiente de fricción, $F = 0.0158$, entonces:

$$H_{f_{tr}} = 0.0158 \cdot \frac{59}{0.25} \cdot \frac{0.407^2}{2 \cdot (9.8)}$$

$$H_{f_{tr}} = 0.03 \text{ m}$$

-Cálculo del Hf, pérdidas locales con Ø 250 mm (accesorios):

$$H_{f_{acc}} = \sum K * \frac{V^2}{2 \cdot g} = (5 K_{c90^\circ} + 1 K_{Te} + 1 K_{salida}) * \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

K_{c90° – coeficiente de los codos de 90 °,

K_{Te} – coeficiente de las uniones en Te,

K_{salida} – coeficiente de salida de tanque.

Entonces:

$$H_{f_{acc}} = (5 (0.35) + 1 (1) + 1 (0.5)) * \frac{0.407^2}{2 \cdot 9.8}$$

$$H_{f_{acc}} = 0.027 \text{ m}$$

- Cálculo de Hf de la tubería con Ø 150 mm;

Tramo recto, (tr);

Tubo de acero con rugosidad; $\xi = 0.0046 \text{ cm}$

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\xi}{Di} = \frac{0.0046}{15} = 0,0003$$

$$N_R = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{1.13 \cdot 0.15}{0.26 \cdot 10^{-6}} = 0.65 * 10^6 = 6.5 * 10^5$$

Con N_R , la rugosidad relativa ($\frac{\xi}{Di}$), se entra en el gráfico de Moody, donde el coeficiente de fricción, $F = 0.0153$, entonces:

$$H_{f_{tr}} = 0.0153 \cdot \frac{1.8}{0.15} \cdot \frac{1.13^2}{2 (9.8)}$$

$$H_{f_{tr}} = 0.01 \text{ m}$$

-Cálculo del Hf, pérdidas locales con Ø 150 mm (accesorios):

$$H_{f_{acc}} = \sum K * \frac{V^2}{2 \cdot g} = (1 K_v + 2 K_{c45^\circ} + 1 K_{entrada} + 1 K_{salida}) * \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

K_{c45° – coeficiente de los codos de 45° ,

K_{Te} – coeficiente de las uniones en Te,

K_{salida} – coeficiente de salida de tanque.

Entonces:

$$H_{f_{acc}} = (1 (0.15) + 2 (0.11) + 1 (0.5) + 1 (0.5)) * \frac{1.13^2}{2 \cdot 9.8}$$

$$H_{f_{acc}} = 0.089 \text{ m}$$

-Cálculo Total de las pérdidas:

$$H_{f_T} = H_{f_{tr} \text{ } \varnothing 250} + H_{f_{acc} \text{ } \varnothing 250} + H_{f_{tr} \text{ } \varnothing 150} + H_{f_{acc} \text{ } \varnothing 150}$$

$$H_{f_T} = 0.03 + 0.027 + 0.01 + 0.089$$

$$H_{f_T} = 0.156 \text{ m}$$

-Cálculo del H_{tv} , carga debida a la tensión de vapor:

$$H_{tv} = \frac{P_{abs}}{\rho_{liq} \cdot g}$$

$$H_{tv} = \frac{1.19 \cdot 9.8 \cdot 10^4}{954.2 \cdot 9.8}$$

Donde el valor de la presión de vapor se obtuvo de software *Chemical Logic Steam Tab Companion*

$$H_{tv} = 12.47 \text{ m}$$

-Cálculo del H_v , carga debida a la velocidad en la tubería de succión:

$$H_v = \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$H_v = \frac{1.13^2}{2 \cdot 9.8}, \text{ en este caso se toma el valor más crítico de la velocidad del sistema, que es } 1.13 \text{ m/s}$$

$$H_v = 0.065 \text{ m}$$

-Cálculo del NPSHd total:

$$\text{NPSHd} = \text{HP} + \text{HZ} - \text{Hf}_r - \text{Ht}_v - \text{Hv}$$

$$\text{NPSHd} = 12.57 + 8 - 0.156 - 12.47 - 0.065$$

$$\text{NPSHd} = 7.88 \text{ m} \geq \text{NPSHr} = 2 \text{ m}$$

El resultado de este nuevo cálculo permite compararlo con el anterior y tomar la decisión adecuada para eliminar las fallas que provoca la bomba de agua de alimentación para la producción de vapor. En el mismo se observa, que el NPSHd es mucho mayor que el requerido por la Bomba y con la propuesta de cambiar el diámetro de succión de la tubería de 100 mm por una de mayor diámetro, que sería 250 mm, se resuelve esta deficiencia. En la siguiente figura, se observa el comportamiento de la carga del sistema que decrece a medida que aumenta el diámetro de la tubería.

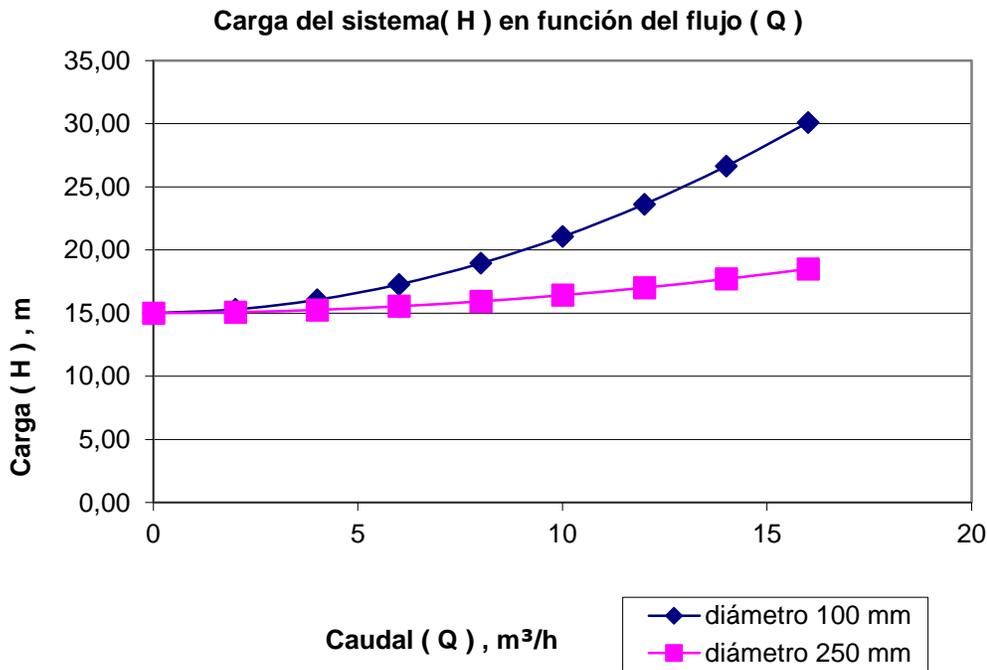


Figura 3.5 Curvas de la carga del sistema en función del caudal de la bomba de agua de alimentación para calderas

El Anexo N° 6 de este trabajo muestra el isométrico de la propuesta de mejora, que incluye la altura total, desde el desareador hasta la succión de la bomba P-52-104 de agua de alimentación. El esquema de la instalación con el estudio realizado, que propone el autor de este trabajo es el siguiente:

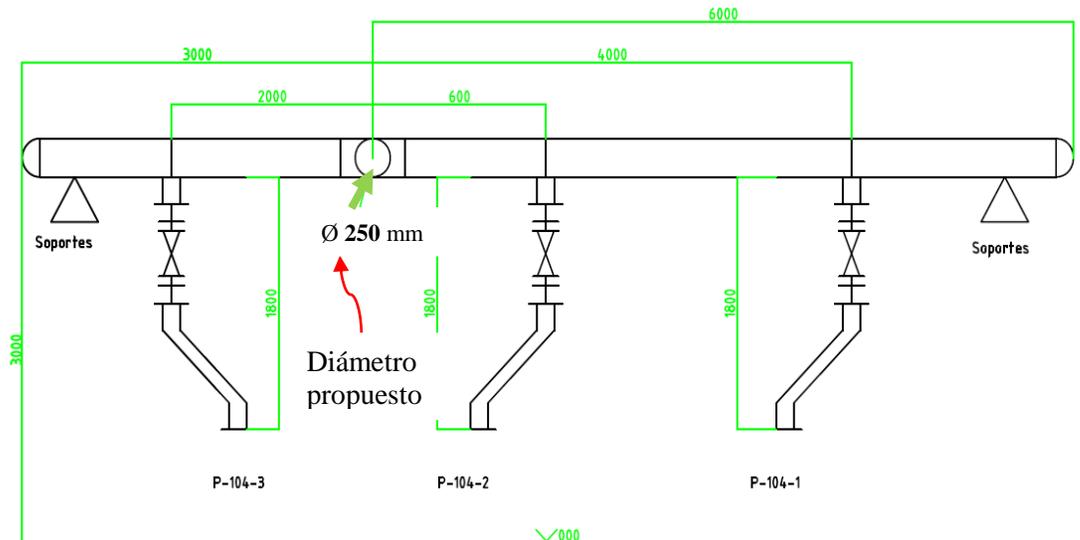


Figura 3.6 Isométrico de la propuesta de mejora para la succión de la bomba P-52-104 de agua de alimentación.

En la figura 3.7, se observa la disposición del colector de succión con el diámetro propuesto en este estudio de las bombas de agua alimentar calderas P-52-104, que dio respuesta a la mejora tecnológica y solucionó el fenómeno de la cavitación.



Figura 3.7 Vista frontal de las bombas que suministran el agua de alimentación a las calderas de la refinería "Camilo Cienfuegos".

En la tabla 3.4, se muestran los resultados de los cálculos que permiten la comparación entre ambas variantes y por ende la validación de la hipótesis planteada.

Tabla 3.4. Resultados de los cálculos para ambas variantes.

Parámetros calculados	Condiciones anteriores al estudio	Propuesta de mejora
Velocidad por la tubería, (m/s) $V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_i^2}$	2.3	0.407
Altura debido a la presión, (m) $HP = \frac{P_{abs}}{\rho \cdot g}$	12.57	12.57
Altura del líquido a la bomba, HZ ; (m)	8	8
Pérdidas friccionales, (m) $H_f = F \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} + \left(\sum \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g} \right)$	8.41	0.156
Carga debida a la tensión de vapor, (m): H_{tv} $H_{tv} = \frac{P_{abs}}{\rho_{liq} \cdot g}$	12.47	12.47
Carga debida a la velocidad en la tubería de succión, (m): $H_v = \frac{v^2}{2 \cdot g}$	0.27	0.065
NPSHd total, (m) $NPSH_d \geq HP + HZ - H_f - H_{TV} - H_{vol}$	-0.58 ≤ NPSHr = 2	7.88 ≥ NPSHr = 2

Como se puede observar en la tabla 3.4, se concluye que:

Al aumentar el diámetro de la tubería de succión de 100 mm a 250 mm:

1. Se logra reducir la velocidad por la tubería de 2.3 m/s a 0.407 m/s, lo que influye directamente proporcional a las pérdidas, que disminuyen de 8.41 a 0.156 m. Esto está dado porque las pérdidas son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad.
2. La carga debida al volumen del líquido disminuyó por tener mayor diámetro, esto corrobora la propuesta de mejora, ya que elimina el fenómeno de la cavitación y consigo la afectación en la producción de vapor por paradas de calderas, que provocan fallas en los procesos de refinación.
3. El NPSHD total, arrojó que con el diámetro anterior, la diferencia entre el NPSH requerido y el disponible es de 1.42 m, mientras que con el aumento del diámetro de succión el NPSH requerido se mantiene en 2, pero el disponible lo supera con creces, con un valor de 7.88 m, es decir una diferencia de 5.88 m, lo que da una disponibilidad muy por encima de lo necesario.

3.4 Análisis técnico económico de la propuesta de mejora.

3.4.1 Implicación económica en la propuesta de mejora actual.

Se conoce que el vapor es un portador energético fundamental en los procesos de refinación de gran importancia, con el aporte calórico del vapor se logran las condiciones necesarias de temperatura para el trabajo futuro de las torres del proceso, para transporte de productos pesado, intercambio de calor, etc. Por otra parte, de lo anterior se deduce que el fenómeno de cavitación provoca fallas que son económicamente no factibles para la economía del país, así que eliminar la causa que provoca esta falla es el objetivo fundamental de este estudio y a continuación observemos los resultados del análisis económico de la propuesta de mejora:

Tabla 3.5 Desglose del costo total de la propuesta de mejora con mayor diámetro del colector de succión, comparado con el diámetro antes de este estudio.

Accesorios	Costo antes de la propuesta de mejora (diámetro 100 mm)		Costo en la propuesta de mejora (diámetro 250 mm)	
	Cantidad	Costo, (USD)	Cantidad	Costo, (USD)
Materiales				
Aceros Acero 20 al 70 % de 3 m.....Precio 900 USD/ t				
COLECTOR				
-Tubo Ac 20	3	2700	3	2700
-Insulación	9	180	18	360
-Soporte	0	0	2(total 6m)	2520
PARA LAS TRES BOMBAS				
-Codos en succión	9	729	9	10647
-Codos en descarga	9	729	9	10647
-Válvulas succión y descarga (de cuña, Pr= 13 atm)	6	865(EURO) =1180.11 USD	6	2200(EURO) =3014.5 USD
-Bridas succión y descarga (Ø 150, Pr= 13 atm)	18	1391.22	18	1391.22
-Tornillos M12x100	144	158.4	144	158.4
-Válvulas Cheque descarga ((Ø 150, Pr= 13 atm)	3	4500(EURO) =6139.32USD	3	4500(EURO) =6139.32USD
-Construcción y Montaje (Contratación, Trabajos Previos, Const y Montaje)		11238.96		11238.96
-Prueba Hidráulica		751.05		751.05
Nota: 1 USD= 0.73298 EUROS		TOTAL= 25197.06 USD		TOTAL= 48176.23 USD

Del análisis de la tabla anterior, se infiere que es perfectamente factible la realización de la mejora en el colector de la succión de las bombas de agua de

alimentación a las calderas P-52-104/1, 2 y A, al sustituir el diámetro antes de este estudio de 100 mm, por uno tres veces mayor de 250 mm, pues aunque el costo de la mejora es prácticamente 2 veces superior, este es un gasto vital para garantizar que en los procesos de refinación no exista fallas de vapor por cavitación. Se analizó las consecuencias de un fallo de vapor por una hora en la Planta Combinada, que es la Planta principal de los procesos de refinación, su fundamentación es la siguiente:

- La planta de destilación atmosférica tiene una producción bruta diaria valorada aproximadamente en \$ 5 000000 CUC/día.
- Si determinamos las consecuencias que conlleva para la Planta Combinada una falla de vapor en una hora, tenemos:
 $5\ 000\ 000 / 24 = 208\ 333$ CUC/h; entonces las pérdidas económicas por no refinar están valoradas en: 208 333 CUC en una hora de parada. Lo que es lo mismo, este valor crece a medida que aumenta el tiempo de parada.
- Además, se van de especificaciones los productos corridos en ese intervalo de tiempo y por consiguiente hay que sacarlos como slop o producto fuera de especificaciones, con su correspondiente consumo de energía, agua y otros productos. A esto se le agregan los daños irreversibles que sufren los catalizadores por quedarse cargados de productos.

Así, que el costo de la propuesta de mejora es necesario y económicamente factible.

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

1. Con el desarrollo del diagnóstico realizado al sistema de generación, se identificaron las causas fundamentales que provocaron las fallas en el suministro de vapor al proceso de refinación.
2. El análisis económico arrojó que aunque el costo de la propuesta de mejora es alto, es necesario ese gasto, por lo que representa para la economía de nuestro país un fallo de vapor durante una hora en los procesos de refinación.
3. El análisis económico valida la hipótesis planteada y da respuesta al objetivo general de este estudio.

CONCLUSIONES

1. La metodología de diagnóstico diseñada en el segundo capítulo es viable para los procesos de generación de vapor, ya que se mostró de forma eficiente el comportamiento de las posibles fallas.
2. El diagnóstico realizado al proceso de generación de vapor demostró la ineficiencia en el suministro de agua de alimentación a las calderas.
3. Según las herramientas aplicadas se pudo comprobar que existen oportunidades de mejoras para disminuir las fallas de vapor en el sistema, provocadas por el fenómeno de la cavitación.
4. El resultado de los cálculos al sistema de succión de la bomba de alimentación demostró, que con el aumento del diámetro en dicho sistema, se logra:
 - Reducir la velocidad por la tubería de 2.3 m/s a 0.407 m/s, lo que influye directamente proporcional a las pérdidas,
 - Disminuir la carga debida a la velocidad en la tubería de succión por tener mayor diámetro,
 - Mejorar el NPSH disponible con un valor de 7.88 m, lo que nos sitúa muy por encima de lo que se busca, mientras que el requerido se mantiene en 2 m.
5. La propuesta de mejora presentada en el tercer capítulo da respuesta a los objetivos planteados.
6. El análisis económico demuestra que la propuesta de mejora es económicamente factible, valida la hipótesis planteada y da respuesta al objetivo general de este estudio.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda utilizar la metodología de diagnóstico presentada como una herramienta de trabajo basada en la filosofía de mejora continua.
2. Se recomienda la aplicación de la propuesta de mejora técnica presentada en el tercer capítulo de este trabajo.
3. Se recomienda socializar los resultados del trabajo, en aras de incorporarlos a una base de datos históricos para consultas futuras.

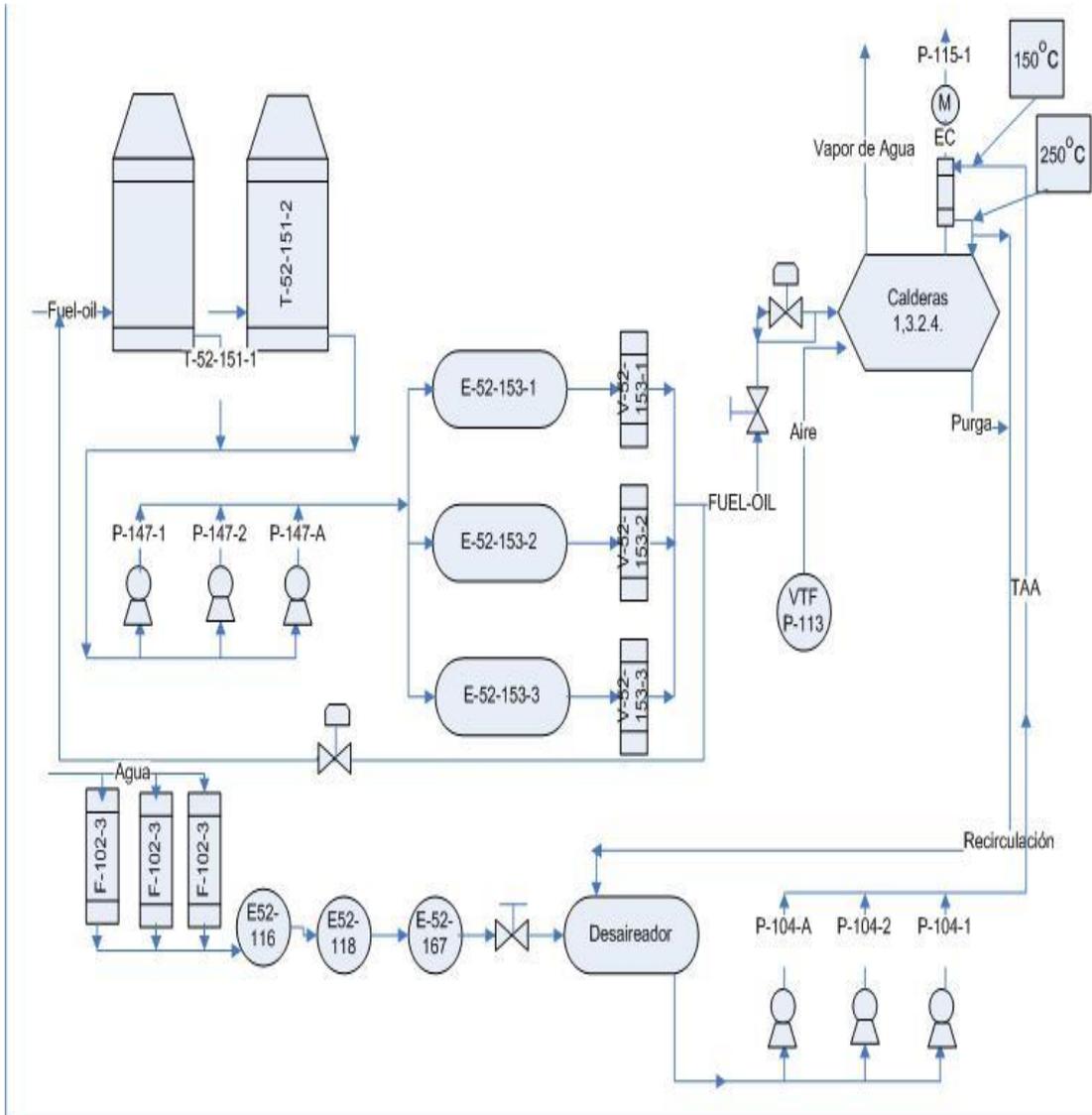
BIBLIOGRAFÍA

- ASME. (1976). Seminario Bombas Centrifugas. Selección, Operación y Funcionamiento. Bogotá: ASME International.
- Bastida Lopez E., M. W. (2007). Uso Racional del Agua. Cienfuegos : Cienfuegos : MES. Universidad de Cienfuegos.
- Birk, J. R. (1994). Centrifugal, Rotary and Reciprocating Pumps. Cleveland, Ohio: Hydraulic Institute Standards for Centrifugal, Rotary and Reciprocating Pumps, 13th ed.
- Borroto Nordelo, A. E. (2006). Gestión y Economía Energética. Cienfuegos: Editorial Universidad de Cienfuegos.
- Campos Abella J.C, e. (2010). Ahorro de energía en sistemas de bombas centrífugas. Universidad Autónoma del Occidente y Universidad del Atlántico. Barranquilla, Colombia: Colciencias. Colombia.
- Campos Avella, J. C. (2001). Gestión Total Eficiente de la Energía. En Gestión Total Eficiente de la Energía. Cienfuegos: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA).
- Disponible en internet. (2013). <http://www.calidad.com>. Herramientas para mejorar la calidad.
- Disponible en internet. (2013). <http://www.monografias.com/trabajos36/bombas-centrifugas/bombas-centrifugas2.shtml#selecc>.
- Disponible en internet.(s.f.). <http://www.monografias.com/trabajos14/problemadelagua.shtml>.
- Disponible en Internet. (s.f.). <http://www.monografias.com/trabajos11/teosis/teosis.shtml>.
- Fernández Díez, P. (2003). Bombas centrífugas u volumétricas. Universidad de Cantabria : <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/Bombas/index.html>.
- CRANE Flow. (s.f.). Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe.
- Goulds Pumps, I. I. (s.f.). (http://www.gouldspumps.com/cat_pf_0001.html) Obtenido de http://www.gouldspumps.com/cat_pf_0001.html.
- G. D. E GUAYCOCHEA. (1992). Flujo en tubos a presión. México: León. 69-100, 149-155,.
- HISC. (2006). Hydraulic Institute Standards for Centrifugal, Rotary and Reciprocating Pumps. Cleveland, Ohio.: Hydraulic Institute.
- J, A. (2006). Pumps and Blowers; Two Phase Flow. N.Y: Wiley.
- Karassik, I. J. (2006). Pump Handbook. En McGraw-Hill, Pump Handbook. New York.
- Loboguerrero, B. (1999). Bombas Rotodinamicas y de Desplazamiento Positivo. En B. Loboguerrero, Bombas Rotodinamicas y de Desplazamiento Positivo.

- Lorenzo, Roberto A. González Castellanos, Mario Yll Lavín Lilian D. Curiel. (2003). Metodología para la Investigación Científica. Matanzas: Universidad de Matanzas.
- Martín.W.F.et.al. (2006). Metodología de la Investigación Científica. Cienfuegos, Cuba: Universidad de Cienfuegos.
- Martínez Díaz, L. (2006). Texto Básico para el curso de Mecánica de los fluidos II. En D. L. Tomas morales Oses, Máquinas de flujo.Texto Básico para el curso de Mecánica de los fluidos II. Cienfuegos: Universidad Cienfuegos.
- Mattews. (2006). Enginner's Guide to Rotating Equipment – The Pocket References. Professional Enginnering Publishing.
- McGraw, H. (2006). Pump Handbook". Karassik – Messina – Cooper – Heald. Thrid Edition. McGraw - Hill.
- McNaughton, K. J. (1984). Bombas. Selección, uso y mantenimiento. Nueva York: Editorial McGraw-Hill.
- Monteagudo, J. (2006). Eficiencia energética en la competitividad de las empresas. Cienfuegos: CEEMA. Universidad de Cienfuegos.
- Monteagudo.J.P. (2004). Eficiencia energética en la competitividad de las empresas. Universidad de Cienfuegos: Ceema. UCF. Cienfuegos : MES.
- MSc. Lobelles Sardiñas G. O. y MSc. Hidalgo Rodríguez L. (2010). Determinación del Costo Exergoeconómico de la Producción de Vapor Saturado en Casa de Calderas y en la Caldera Recuperadora de la Refinería de Cienfuegos. Cienfuegos.
- MSc.Lobelles.S.G., D. G. (2010). Estrategia para uso racional del agua en el proceso de fabricación de alcohol en la destilería ALFICSA de Cienfuegos. Cienfuegos : Unpublished. Universsidad Carlos Rafael Rodríguez.
- Neerken Richard, F. (2000). Selección de la bomba adecuada. Pasadena. California: The Ralph M. Parsons Company.
- Neerken, R. F. (1974). Pump Selection for the Chemical Proccss Industrias. En R. F. Neerken, Pump Selection for the Chemical Proccss Industrias. New York: Chem. Erg.
- Osborn, A. (1963). Applied imagination: Principles and procedures of creative problem solving. New York, NY: (Third Revised Edition). New York, NY: Charles Scribner's Sons.
- PEMEX. (1993). Procedimiento para la reopración general de bombas centrífugas tipo proceso de un paso. Refinación . México.
- PEMEX. (2003). Manual para la formulación y seguimiento de procedimiento de Trabajo de mantenimiento de plantas. Pemex.Refinación Mexico.
- Pérez Barreto, R. (2004). Procedimiento para evaluar y seleccionar bombas centrífugas. Minería y Geología.

- Pérez R.et.al. (2006). Problemas del agua. Disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos14/problemadelagua.shtml>.
- Refinería de Cienfuegos. RF-DT-IT-14-22. (2009). Instrucción para la Inspección y el Mantenimiento de las Bombas Centrifugas. Sistema de Gestión de la Calidad.
- Samanta, S. (2001). Medio ambiente y desarrollo. Disponible en Internet:
<http://www.tierramerica.net/2001/04/01/noticias3.shtml> .
- Sobrepera, R. (2006). Metodología para evaluar la gestión del agua en la producción y en los servicios. Cienfuegos: MES. Universidad de Cienfuegos.
- Viejo, Z. M. (2003). Bombas: Teoría, Diseño y Aplicaciones. México: Limusa. 3ra. edición, pp.121-130.

Anexo N° 1: Diagrama de flujo del proceso de generación de vapor en la refinería de Cienfuegos.



Anexo Nº 2. Resultado de la técnica Tormenta de ideas.

1. Los sobrecalentadores de las calderas eslovacas están en mal estado técnico.
2. La insulación de las calderas no es buena y provoca pérdidas de calor.
3. La llama de los quemadores inciden directamente en la zona de radiación.
4. No existe un método de limpieza exterior de los tubos en las calderas eslovacas. No tienen montado sopladores de hollín.
5. La planta de tratamiento de condensado está fuera de servicio, por lo que no se recupera el mismo.
6. No se puede controlar desde el panel el cierre de las válvulas de salida en las líneas de vapor que van para el área de Tanques y Muelle.
7. La línea de condensado al desareador está en mal estado técnico.
8. Las válvulas mecánicas de cierre rápido de vapor de 13 kgf/cm² para atomización de las calderas F-101/1,2 y 3 están falta de mantenimiento.
9. Es necesario empaquetar la válvula mecánica de vapor de 6 kgf/cm² en la línea de vapor al desareador.
10. Cambiar líneas de descarga de vapor al silenciador desde la línea 41/2 y 41/3 la existente es de diámetro 80 situada por una de diámetro 150.
11. Reapretar preñe de válvulas para eliminar salideros del J-52-143.

Anexo N° 3. Guía de Observación.

1. Determinar y definir lo que se va a observar: Se realizará observación del Proceso de Generación u uso del vapor y sus subprocesos auxiliares con el objetivo de comprobar su funcionamiento. Para esto se tendrá en cuenta: estado técnico de las calderas y sus equipos auxiliares que intervienen en el proceso de generación de vapor. Se recorrerán las líneas fundamentales y secundarias del sistema de distribución del vapor, se observará el grado de deterioro de la insulación de estas. Se observará para qué y cómo se consume vapor en las diferentes áreas consumidoras. Se observará y comprobará la situación de los medios de medición existentes.
2. Estimar el tiempo necesario de observación: La observación se realizará durante un periodo de 21 días de trabajo con una frecuencia diaria.
3. Obtener la autorización de la gerencia para llevar a cabo la observación: Para realizar la observación del proceso se contó con la aprobación del jefe del área de generación de vapor y facilidades auxiliares Ing. Israel Martínez Mendoza.
4. Explicar a las personas que van a ser observadas lo que se va a hacer y las razones para ello: Individualmente se le explicó a cada trabajador del área el objetivo de la observación, solicitando su disposición y cooperación voluntaria.

Anexo Nº 4. Guía para la Entrevista.

Como Usted conoce estamos realizando una investigación relacionada con el funcionamiento del sistema de vapor, al cual llamamos proceso de generación y consumo de vapor, en el cual usted labora. En tal sentido le agradecemos nos dedique unos minutos de su preciado tiempo para responder algunas preguntas.

I. Cuestiones relacionadas con organización del proceso.

- 1.1. Conocimientos acerca de la organización del proceso
- 1.2. Conocimientos sobre el gráfico de control analítico, dígame: frecuencia de toma de la muestra, objetivos con que se realizan los análisis y estándares establecidos.
- 1.3 Conocimientos sobre sistema de estimulación y su relación con este sistema del vapor.
1. 4. Metodologías para gestionar el consumo de vapor. Estrategias para su consumo.
1. 5. Conocimientos sobre la seguridad industrial.
- 1.6. Estado actual de la capacitación a los operadores.

II. Respecto al funcionamiento del proceso.

- 2.1. Precisión de los equipos registradores
- 2.2. Asimilación del cambio de tecnología
- 2.3. Relación con otros procesos y áreas funcionales
- 2.4. Sobre los indicadores de eficiencia y eficacia del proceso
- 2.5. Impacto del proceso en el medio ambiente.
- 2.6. Estado técnico de los equipos en explotación.
- 2.7. Planes de mantenimiento preventivo.
- 2.8. Conocimientos sobre medidas de ahorro.

III. Respecto a las relaciones formales de comunicación e intercambio de información.

- 1.1. Medios y vías de comunicación existente. Efectividad
- 1.2. Sistemas de influencia

Anexo N° 6. Isométrico de la propuesta de mejora, que incluye la altura total, desde el desareador hasta la succión de la bomba P-52-104 de agua de alimentación.

