

Trabajo de Diploma

Título: Evaluación del sistema de bombeo de los generadores de vapor de la Refinería de petróleo “Camilo Cienfuegos”.

AUTOR: Nelson Eugenio Ponce Varona

TUTOR: MSc Regino R. Álvarez Cancio-Bello

Cienfuegos, 2010.

DECLARACION DE AUTORIDAD

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

“Carlos Rafael Rodríguez”

Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de este envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.
Nombre y Apellidos. Firma

Firma del Tutor
Nombre y Apellidos. Firma.

Sistema de Documentación y Proyecto.
Nombre y Apellido. Firma.

Cienfuegos, 16 de Julio de 2010.

Dr. Juan F. Puerta Fernández.
Facultad de Ingeniería Mecánica.

Decano.

Asunto: Aval del Tutor al trabajo de Diploma “ Evaluación del sistema de bombeo de agua de alimentar los generadores de vapor de la Refinería “ Camilo Cienfuegos ” .
Del estudiante Nelson E. Ponce Varona.

Por el presente pongo en su conocimiento que el trabajo de referencia ha sido revisado y cumple con los requisitos exigidos en cuanto a la forma de elaboración del documento.

El mismo cumple también los objetivos planificados y es adecuada la fundamentación científica de su contenido, para la presentación y defensa ante el tribunal indicado por la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Al tanto de sus indicaciones, queda,

Atentamente.

Tutor: MSc Regino R. Alvarez Cancio – Bello

Dedicatoria

*A ustedes les dedico este trabajo que además de ser fruto de mis esfuerzos,
es también parte de sus sueños.*

*A mis padres Mercedes Varona y Antonio Ponce,
en especial a mi papá, que enfermo ha estado a mi lado
para ver convertido en realidad nuestro anhelo,
ambos me dieron la oportunidad de vivir
y me han mostrado el camino correcto.*

A mi Hijo por ser el mejor regalo que me dio la vida.

Agradecimientos

*Agradezco la compañía, la confianza y el optimismo
de todos aquellos que estuvieron cerca de mí y de éste, mi anhelo.*

A mi hijo, por su existencia que me obliga a superarme.

*A Regino Álvarez, Marcos Consuegra y José Monteagudo,
por brindarme tanta ayuda.*

*A mi suegra Aleida Curbelo Álvarez
por sus constantes consejos y su paciencia conmigo.*

*A mi esposa Dunia Hernández Curbelo por todo su apoyo y dedicación en
el desarrollo de este trabajo.*

A mis compañeros de aula por su comprensión y amistad.

*A mis compañeros de trabajo
por su disposición y ayuda en las horas que empleé
en recopilar los datos necesarios para este trabajo.*

A todos aquellos que de una forma u otra se preocuparon por mí.

Pensamiento

“En tanto crece el costo de la energía y se deteriora el medioambiente, mejorar el uso final de la energía eléctrica es más necesario y exige mayor atención”.

Fidel Castro Ruz

Resumen

Resumen:

El presente trabajo se realizó en la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”, en el mismo se hizo un estudio del sistema de bombeo de los generadores de vapor, el cual conllevó al análisis de las P-104 (Bombas de agua de alimentación a caldera), así como al de los sistema de regulación de flujo dando a conocer los diferentes tipos de regulaciones y los controles que posibilitan el accionamiento de las protecciones.

Se obtuvieron las curvas características de la bomba a partir de los datos de chapa proporcionados por el fabricante y se comprobaron las curvas de la bomba en condiciones de campo, luego se construyó la curva del sistema y se determinó el punto de operación de la bomba, dando como resultado ineficiencia en el trabajo de la misma, el cual está provocando un gran consumo de energía eléctrica y un aprovechamiento inadecuado de la energía del motor.

Se analiza una nueva bomba con el fin de obtener mejoras energéticas, se realizó el cálculo del Costo del Ciclo de Vida de la bomba propuesta para 10 años de trabajo, el cual resulta inferior al de la bomba actual y por consiguiente es más factible económicamente, la misma demostró un aprovechamiento eficaz de la energía del motor.

Indice

<u>Introducción.....</u>	1
<u>Capítulo I. Sistema de Bombeo con bombas centrífugas. Regulaciones de flujo, selección y control de operación.</u>	4
I.1. Caracterización del sistema de bombeo con bombas centrífugas.....	4
I.2. Bomba de alimentación a caldera.....	6
<u>I.3. Capacidad de la Bomba de Alimentación a Caldera.....</u>	6
<u>I.3.1. Inclinação de la curva carga – capacidad.....</u>	7
<u>I.4. Métodos de regulación de flujo o gasto en Sistemas de Bombeo.</u>	10
<u>I.4.1. Regulación de gasto mediante estrangulación.....</u>	10
<u>I.4.2. Regulación de gasto mediante recirculación.....</u>	12
<u>I.4.3. Arranque o paro de la bomba.....</u>	13
<u>I.5. Funciones fundamentales de control.</u>	14
<u>I.5.1. Controles de interrupción.....</u>	14
<u>I.5.2. Interruptor de flotador.....</u>	15
<u>I.5.3. Interruptor de presión.....</u>	16
<u>I.5.4. Controles de consumo de energía.....</u>	16
<u>I.5.5. Control de termostato.....</u>	17
<u>I.5.6. Gobernadores de sobrevelocidad.....</u>	17
<u>I.5.7. Interrupción completa de flujo sin parar la unidad.....</u>	17
<u>I.5.7.1. Control manual de la válvula de descarga.....</u>	18
<u>I.5.8. Variación de las condiciones de operación.....</u>	19
<u>I.5.9. Modificación con la posición de las válvulas.....</u>	21
<u>I.5.10. Regulación de la capacidad de las máquinas centrífugas.....</u>	21
<u>I.6. Variadores de velocidad o reguladores de frecuencia.....</u>	23
I.7. Problemática nacional relacionada con la selección y explotación de equipos de bombeo.....	26
<u>Conclusiones parciales.....</u>	26
<u>Capítulo II. Características hidráulicas y energéticas del Sistema de Bombeo.....</u>	32
<u>II.1. Desarrollo de una metodología para la obtención de las curvas energéticas de las bombas centrífugas en condiciones de campo.....</u>	32
<u>II.2. Metodología para la obtención de las curvas energéticas de las bombas a partir de los datos de chapas de las mismas.....</u>	33
<u>II.3. Cálculo de la carga del sistema.....</u>	36

<u>II.4. Cálculo de la carga de la bomba:</u>	39
<u>II.5. Mediciones realizadas para determinar la eficiencia de la bomba y el consumo del motor para 18 T/h de flujo.</u>	39
<u>II.5.1. Cálculo de la Eficiencia</u>	41
<u>II.6. Análisis de los resultados.</u>	42
<u>Conclusiones parciales.</u>	45
<u>Capítulo III. Soluciones para las deficiencias de operación del sistema de bombeo.</u>	47
<u>III.1. Datos esenciales requeridos para la selección de bombas.</u>	47
III.1.1. Número de unidades.....	48
<u>III.2.1. Naturaleza de los líquidos.</u>	49
<u>III.1.2.1. Temperatura.</u>	49
<u>III.1.2.2. Peso Específico.</u>	50
<u>III.1.2.3. Viscosidad.</u>	50
<u>III.1.3. Capacidad requerida.</u>	51
<u>III.1.4. Condiciones de succión.</u>	52
<u>III.1.5. Condiciones de descarga.</u>	53
<u>III.1.6. Tipos de servicio.</u>	54
<u>III.1.7. Posición de instalación.</u>	54
<u>III.1.8. Características de la fuerza motriz.</u>	55
III.1.9. Espacio, peso y limitaciones de transporte.....	55
<u>III.1.10. Localización de la instalación.</u>	55
<u>III.1.11. Requerimientos especiales.</u>	55
<u>III.2. Solicitudes para servicios especiales.</u>	56
<u>III.2.1. Servicios de abastecimiento de agua. Servicio de alimentación a calderas.</u>	57
<u>III.3. Características de la bomba seleccionada.</u>	58
<u>III.4. Análisis del comportamiento de la bomba seleccionada.</u>	61
III.5. Determinación del costo del ciclo de vida.....	62
<u>III.6. Comparación de los resultados obtenidos de ambas bombas.</u>	64
<u>Conclusiones Parciales.</u>	66
<u>Conclusiones.</u>	68
<u>Recomendaciones.</u>	70

<u>Bibliografia:</u>	72
----------------------------	----

Introducción.

Las bombas centrífugas se utilizan donde quiera que cualquier cantidad de líquido quiera moverse de un lugar a otro. Las bombas centrífugas se encuentran en servicios tales como, plantas termoeléctricas, de abastecimiento de agua, agua de albañal, planta de producción química, y talleres siderúrgicos, plantas procesadoras de alimentos, refinerías, servicios hidroeléctricos, entre otros. Mientras que estas bombas tienen mucho en común, tienen también variantes para ajustarse a los requerimientos y necesidades especiales de cada servicio.

Las bombas, luego de los motores eléctricos, son las segundas máquinas más utilizadas en el mundo, se calcula que los sistemas de bombeo demandan cerca del 20% de la energía eléctrica mundial y en la operaciones de determinadas plantas industriales están en el rango del 25 al 50 % de la energía utilizada; las bombas centrífugas constituyen no menos del 80 % de la producción mundial de bombas, más del 80 % de los sistemas de bombeo utilizan bombas centrífugas, en todas las industrias entre el 18 y el 20 % del consumo de energía eléctrica lo aporta el bombeo y alrededor del 65 % de este consumo se realiza en bombas centrífugas.

Un programa de mejora de eficiencia energética no debe evaluar sólo la eficiencia del motor, sino además, el comportamiento del conjunto motor – bomba, para obtener de una decisión los mejores resultados, tanto energéticos como económicos que posibiliten lograr importantes ahorros de energía.

Problema Científico:

Las bombas centrífugas de los generadores de vapor de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” tienen un gran consumo energético, por encontrarse sobredimensionadas, lo cual afecta la eficiencia energética del sistema de bombeo e incrementa los gastos de energía eléctrica.

Hipótesis: Mediante la evaluación hidráulica y energética del sistema de bombeo de los generadores de vapor, se podrán determinar las posibles soluciones que permitan

incrementar la eficiencia energética del sistema de bombeo y reducir los gastos de la energía eléctrica.

Objetivo General: Evaluar el sistema de bombeo de agua de alimentación de los generadores de vapor de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”.

Objetivos Específicos:

1. Caracterización de los equipos energéticos Bomba, Motores y Generadores de Vapor.
2. Caracterización hidráulica y energética del Sistema de Bombeo.
3. Determinación de las curvas características del Sistema de Bombeo.
4. Determinación del rendimiento del Sistema para diferentes capacidades.
5. Realizar el análisis del costo del ciclo de vida de la solución propuesta.

Capítulo I

Capítulo I. Sistema de Bombeo con Bombas Centrífugas.

Regulaciones de flujo, selección y control de operación.

I.1. Caracterización del Sistema de Bombeo con Bombas Centrífugas.

Este trabajo está realizado en el sector energético de la Refinería de Petróleo Camilo Cienfuegos” y está basado en el cálculo hidráulico y el análisis de los sistemas de regulación de flujo de dicho sector, con el fin de evaluar su funcionamiento.

El sector está caracterizado por un depósito o desaireador (J-143) el cual trabaja a 0.8kg y una temperatura de 104⁰C que tiene como función principal la de eliminar el O₂, se realiza debido a que en su interior presenta unas bandejas con orificios que el agua le entra por encima cayendo en forma de llovizna, luego al entrar vapor a 3kg a contra corriente se realiza la desaireación, el agua queda almacenada en la parte inferior del depósito, posteriormente el agua es succionada mediante la bomba de agua de alimentación (**Figura I.1**) descargando la misma a una presión de 22kg a través de las líneas y accesorios hacia los generadores de vapor que trabajan con una presión de 12kg.



Figura I.1: Motobomba P-52-104

En las instalaciones de bombeo con electrobombas centrífugas, el costo fundamental durante todo el ciclo de vida, es el debido al consumo de energía eléctrica. Esta realidad, unida a la crisis energética y el impacto medioambiental asociado, ha hecho que los fabricantes de motores y bombas más importantes hayan desarrollado nuevos tipos de máquinas con características de diseño dirigidas a la disminución de las pérdidas de energía a expensas, por supuesto, del costo de las máquinas. Sin embargo, en muchas instalaciones de bombas o estaciones de bombeo no se dispone de un procedimiento no invasivo y fácil de aplicar para evaluar la eficiencia del motor, de la bomba y del conjunto en condiciones reales de explotación, de modo que las inversiones y las medidas adoptadas para elevar la eficiencia puedan ser dirigidas con mayor eficacia hacia el mejoramiento energético al considerar todos los componentes del sistema.

Por otro lado, una parte no despreciable de los motores que accionan bombas centrífugas operan entre el 55 y el 65 % de su capacidad nominal debido al sobredimensionamiento, a la selección inadecuada, a bajos niveles de demanda u otras causas. Como consecuencia, existen sistemas operando con limitada eficiencia, mayores pérdidas y un incremento del costo del ciclo de vida. El incremento de la eficiencia en muchos de estos casos puede lograrse reemplazando el motor, la bomba, o ambos o estableciendo nuevas estrategias de control entre otras técnicas posibles.

Se hace por tanto necesario llevar a cabo estudios encaminados a evaluar el comportamiento de las instalaciones de bombeo de forma integral, tanto de los motores como de las bombas, mediante la aplicación de metodologías adecuadas, respaldadas técnicamente por un conjunto de procedimientos que garanticen la determinación de la eficiencia real de cada uno de sus componentes.

Donde deba ser movido cualquier cantidad de líquido de un lugar a otro, se usan bombas centrífugas. Las bombas centrífugas pueden encontrarse en diversos tipos de servicios como en fábricas procesadoras de alimentos, operaciones de dragado o de consolidación con chorro de agua, servicios hidroeléctricos, plantas termoeléctricas, plantas de abastecimiento de agua, refinerías de petróleo, y casi todos los barcos, ya sean de vapor o máquinas diesser.

Sería una tarea monumental presentar todos los requerimientos de cada tipo diferente de aplicación y todas las particularidades, por separado, que distinguen las bombas en los distintos servicios.

I. 2. Bomba de Alimentación a Caldera.

Una lista de las condiciones de servicio de las bombas de alimentación a caldera debería incluir no solo la capacidad de la bomba, condiciones de succión y descarga, la temperatura y la presión del agua de alimentación, sino también datos como el análisis químico del agua, el PH a la temperatura de bombeo, la variación de presión y temperatura de succión si hay algunas, y otra información pertinente que pueda reflejarse en el diseño hidráulico o mecánico de las bombas de alimentación a calderas.

Siempre que el diseñador de centrales de fuerza tenga cualquier duda, deberá someterse un diagrama completo del sistema de alimentación de agua y del balance térmico al fabricante de las bombas. Después de estudiar estos planos el fabricante frecuentemente podrá sugerir un arreglo alternativo del equipo que pudiera dar por resultado una operación más económica, una disminución del costo inicial de la instalación o una mejora en la vida del equipo reduciendo por lo tanto, el gasto eventual de mantenimiento.

I. 3. Capacidad de la Bomba de Alimentación a Caldera.

Una vez que se ha determinado el flujo máximo a caldera, se puede establecer la capacidad total de la bomba de alimentación a caldera añadiendo un margen a este flujo máximo para cubrir las oscilaciones de la caldera y la reducción eventual por el desgaste.

En la mayoría de los casos se incluye una bomba de alimentación a caldera, sin embargo en las estaciones centrales de ahorro se está haciendo costumbre instalar una bomba de alimentación a caldera de la capacidad total.

I.3.1. Inclínación de la curva carga – capacidad.

En el margen de velocidades específicas que normalmente se encuentran en las bombas centrífugas de varios pasos de alimentación a caldera, el aumento de carga del punto de eficiencia óptima variará de un 10 a 25%. Además la curva de carga – capacidad para estas bombas es de tal forma que la caída de carga es muy lenta a bajas capacidades, acelerándose al aumentar la capacidad.

Si la bomba se opera a capacidad constante, la diferencia de presión entre la curva de carga - capacidad de la bomba y la curva de carga del sistema debe compensarse con el regulador de alimentación de agua. Así, entre mayor sea la elevación de carga al cierre, más deberá estrangularse la presión y teóricamente, desperdiciarse. También entre más elevación, mayor será la presión a que se sujetan la tubería de descarga y los calentadores cerrados. Sin embargo, no es conveniente seleccionar una elevación al cierre muy baja porque una curva muy plana no permite un control estable, porque un pequeño cambio de presión corresponde a un cambio relativamente grande de capacidad, y un diseño que da una elevación muy baja al cierre, puede dar por resultado una curva de carga – capacidad inestable, difícil de usar en operación en paralelo.

Cuando se deben operar varias bombas de alimentación a calderas en paralelo, deben tener curvas estables y cargas iguales al cierre. De otra manera, el flujo total se dividirá desigualmente y una de las bombas puede salirse de la línea de hecho, después de que ocurre un cambio en la capacidad requerida con bajo flujo.

Una bomba de alimentación a caldera se selecciona para cierta capacidad a una presión y generalmente no se supone que opera a una capacidad más allá de estas condiciones de diseño. En otras palabras, en contraste con una bomba de servicio general normal para la cual puede aumentar el consumo de fuerza con una disminución de carga y consecuentemente, un aumento en capacidad, una bomba de alimentación a calderas tiene una capacidad máxima muy bien definida porque opera en una curva de

carga del sistema compuesta por la presión del colector de la caldera más las pérdidas por fricción en la descarga. Si, como debiera ser, la capacidad de diseño de la bomba se selecciona como la capacidad máxima que puede suponerse en condiciones de emergencia, no puede haber un aumento mayor en cualquier condición de operación, ya que el requerimiento de presión correspondiente a una capacidad incrementada excederá la presión de diseño de la bomba. Aún cuando la presión de diseño incluye un margen de seguridad, la demanda de la caldera no excede la capacidad de diseño y el regulador de alimentación de agua impartirá una pérdida artificial adicional por fricción para aumentar la presión requerida hasta la presión disponible en la bomba.

Cuando dos bombas se operan en paralelo para alimentar una sola caldera, la situación es algo diferente. Si una de las bombas se saca de la línea a carga parcial, la bomba que queda podría fácilmente operar a capacidades en exceso de su diseño puesto que su curva de carga – capacidad interceptaría la curva de carga del sistema en un punto más bajo que su carga de diseño. En este caso, es necesario determinar la capacidad de la bomba en el punto de intersección; los caballos de fuerza correspondientes a esta capacidad serán los máximos supuestos.

No es necesario seleccionar un impulsor tan grande que no se sobrecargue en ningún punto de la curva de operación de la bomba de alimentación a la caldera. Sin embargo, los motores eléctricos que se usan en el servicio de alimentación a calderas, generalmente tiene una capacidad de sobrecarga de 15% y es generalmente la práctica reservar esta capacidad de sobrecarga como un margen de seguridad y seleccionar un motor que no se sobrecargue a la capacidad de diseño. Ocurren excepciones en el caso de motores de tamaño muy grande

La mayoría de las bombas de alimentación a calderas en plantas de vapor de tamaño pequeño o mediano son movidas por motor eléctrico. En el pasado, se instalaron como protección bombas de repuesto movidas por turbina de vapor contra la interrupción del suministro de fuerza eléctrica, pero esta práctica ha desaparecido en estaciones centrales de vapor y raras veces se encuentran aún en plantas industriales.

En los últimos años ha ocurrido una tendencia a alejarse del motor eléctrico como impulsor en grandes estaciones centrales de vapor de más de 150 000 kW. El primer cambio fue a turbinas de vapor como impulsores porque:

1. Una turbina de vapor independiente aumenta la suficiencia de la planta eliminando la fuerza auxiliar requerida para alimentar la caldera.
2. El aprovechamiento apropiado del vapor de escape en los calentadores de agua de alimentación puede mejorar la eficiencia del ciclo.
3. En muchos casos, la eliminación de los motores de las bombas de alimentación a calderas puede permitir una reducción del voltaje auxiliar de la estación, con una disminución apreciable en el costo.
4. La velocidad del impulsor puede igualarse exactamente a la velocidad óptima de la bomba.
5. Una turbina de vapor provee una operación de velocidad variable sin un componente adicional como un acoplamiento hidráulico.

El desarrollo más notable en la selección del impulsor de una bomba de alimentación a calderas, sin embargo, ha sido el uso del generador principal de turbina para mover las bombas de alimentación a las calderas. La velocidad varía interponiendo un acoplamiento hidráulico o magnético entre el generador y la unidad de bombeo de alimentación a la caldera.

Sí para determinadas aplicaciones se requieren variaciones en las condiciones de operación o tener en cuenta un margen de seguridad en el flujo, los procesos productivos de las empresas requieren condiciones de bombeo diferentes a las del gasto nominal, por lo tanto, es necesario aplicar algún tipo de control o regulación de gasto.

I.4. Métodos de Regulación de flujo o gasto en Sistemas de Bombeo.

Los métodos de regulación de gasto se obtienen mediante:

- 1) Regulación del gasto por estrangulación de la tubería que conduce el fluido.
- 2) Regulación del gasto mediante recirculación.
- 3) Arranque o paro de la bomba.

En la regulación de gasto hay dos aspectos fundamentales:

- 1) Banda de regulación de gasto (se expresa como los valores máximo y mínimo de gasto).
- 2) El tiempo que trabaja para los diferentes niveles de gasto entre los valores máximo y mínimo.

I.4.1. Regulación de Gasto Mediante Estrangulación.

Se obtiene mediante una válvula que va montada en la tubería en la zona de descarga de la bomba. Cerrando esa válvula se produce una pérdida de carga adicional, la cual cambia la carga total del sistema.

Al disminuir la capacidad o gasto por medio de estrangulación se altera la curva del sistema al producirse una pérdida de fricción debido a la válvula de estrangulación, tal como se muestra en la **Figura I.2.**

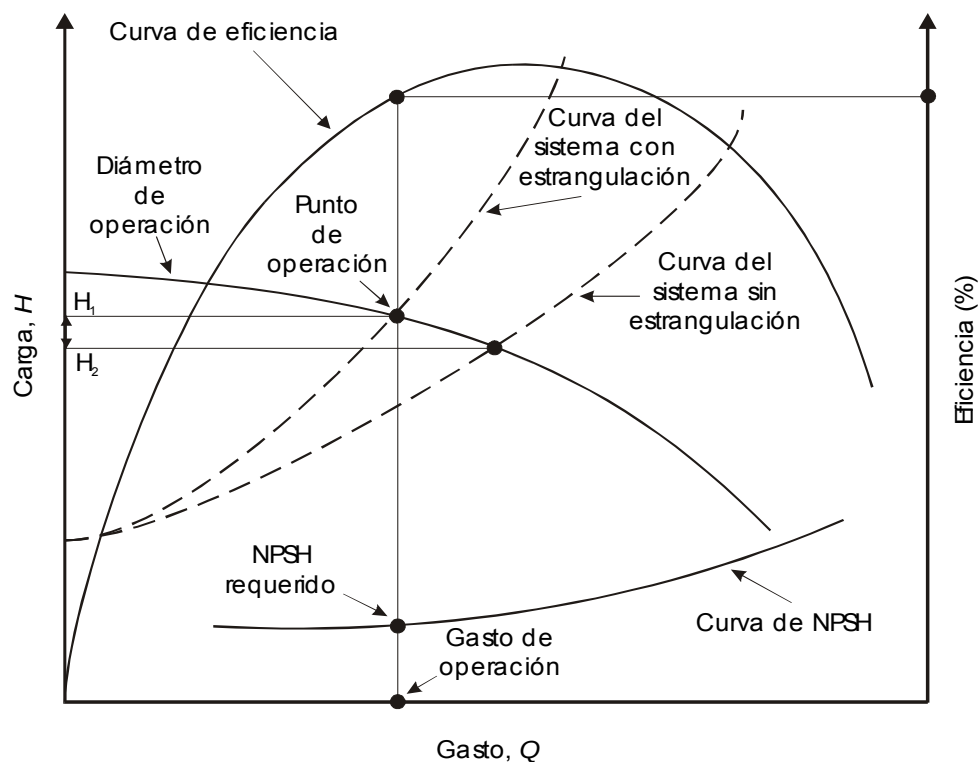


Figura I.2: Curva característica de la Regulación de Gasto Mediante Estrangulación

En la **Figura I.3** se muestra el esquema de la válvula de estrangulación, para el método en análisis.

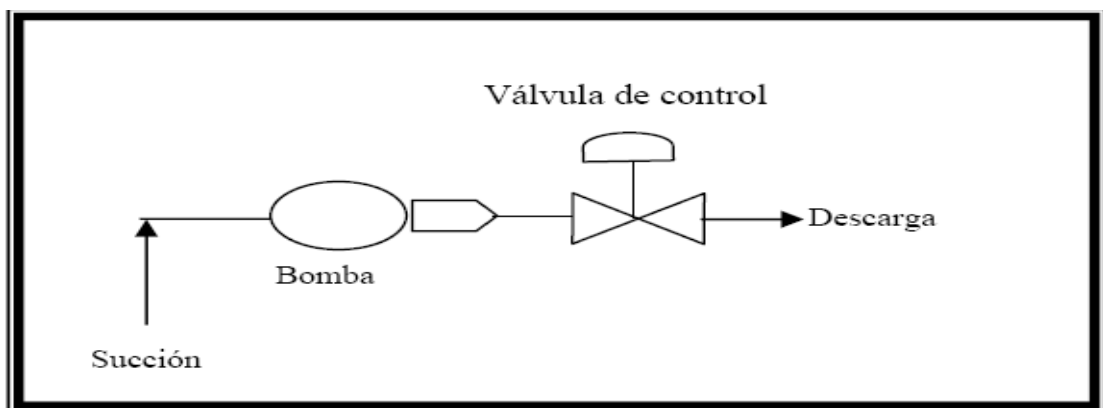


Figura I.3: Esquema de la válvula de estrangulación.

I. 4.2. Regulación de Gasto Mediante Recirculación.

Esta regulación se logra mediante una válvula auxiliar instalada en un tubo en derivación con la bomba (by-pass). De este modo, parte del fluido que pasa a través de la bomba se regresa al tanque de succión o al tubo que va de éste a la bomba, tal como se muestra en la **Figura I.4.**

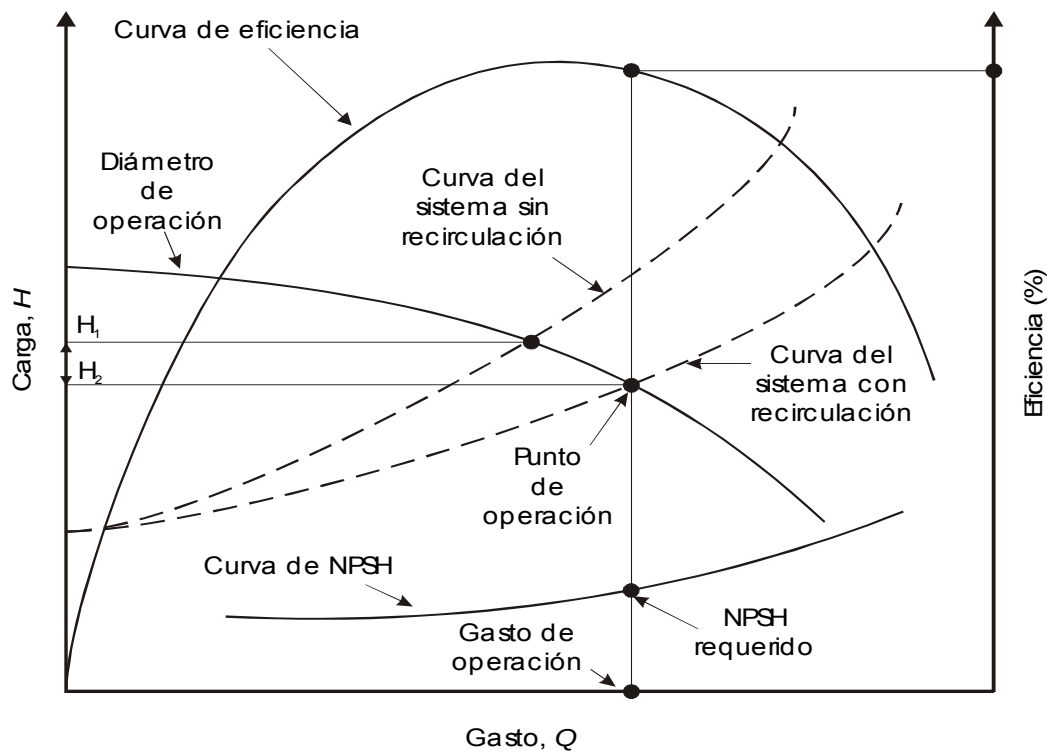


Figura I.4: Regulación de Gasto Mediante Recirculación

En la **Figura I.5.** se observa el diagrama de la válvula de recirculación, para el método en análisis.

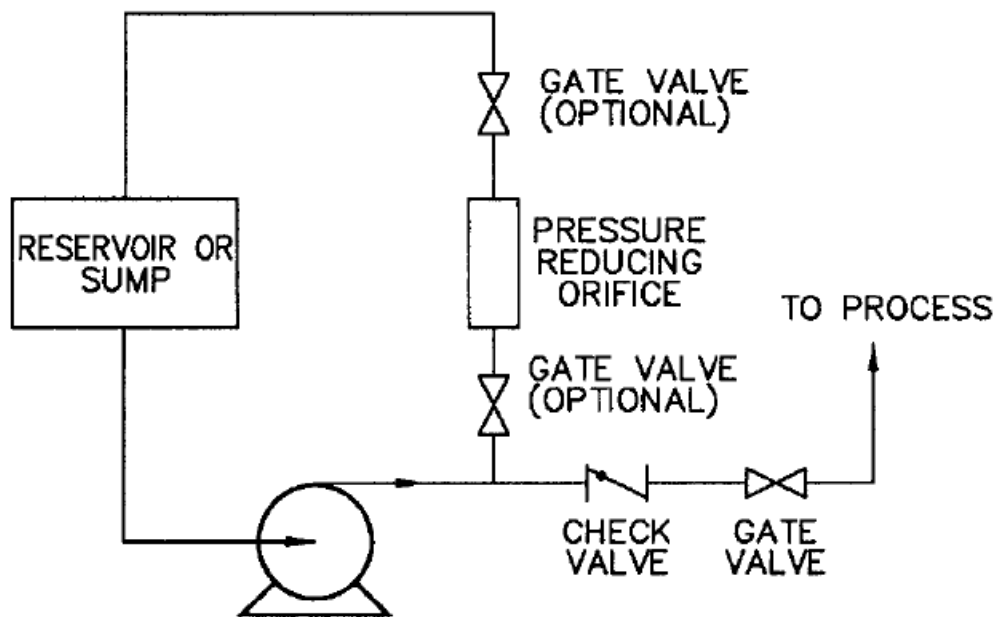


Figura I.5: Diagrama de recirculación.

Las limitaciones energéticas del método de regulación por recirculación, desvío o by-pass, se detallan a continuación:

1. Al pasar al punto de operación la bomba maneja un mayor flujo y reduce su carga de trabajo, demandando una mayor potencia y requiriendo mayor carga neta positiva en la succión.
2. Se reduce el flujo destinado al proceso, pero se paga una mayor cantidad de energía en esta operación.
3. Aunque el valor de rendimiento de la bomba es el mismo no es aconsejable trabajar en este punto dado que opera de forma menos rentable.

I.4.3. Arranque o Paro de la Bomba.

Este es el método de regulación de gasto más sencillo, ya que sólo consiste en el apagado o encendido del motor de la bomba de acuerdo a la cantidad de gasto que se requiera, por ejemplo, una bomba que lleva agua a un tanque elevado mediante un control por nivel.

I.5. Funciones fundamentales de control.

En la mayoría de las instalaciones, las bombas funcionan continuamente en un sistema durante periodos relativamente largos. Con frecuencia, la única interrupción de la operación ocurre como resultado de algún defecto mecánico en el sistema o en la propia bomba, o debido al examen o reparación programados. Las funciones fundamentales de los controles de bombas centrífugas son, por lo tanto, en el sentido de permitir a la bomba que se ajuste a las variaciones requeridas de las condiciones de operación, incluyendo la ausencia completa de demanda en la descarga.

Para simplificar, los controles de bombas centrífugas pueden dividirse en dos grupos principales de acuerdo con sus funciones:

1. Controles que interrumpen completamente el flujo o hace que se reanude.
2. Controles que cambian las condiciones de operación ya sea la capacidad de bomba, la carga total, o ambos.

I.5.1. Controles de interrupción.

Las razones para iniciar o suspender la descarga de la bomba variarán marcadamente; se debe considerar, por lo tanto, la siguiente lista como completa. La descarga de la bomba puede suspenderse si:

- 1) La fuente de abastecimiento se ha agotado ya sea completamente o al nivel deseado.
- 2) El recipiente al cual esta descargado la bomba se ha llenado al nivel deseado. Un ejemplo típico es el llenado de un tanque de depósito para servicio o para abastecimiento de agua potable.
- 3) La presión del sistema al que está descargando la bomba ha alcanzado la magnitud requerida.
- 4) Se ha terminado un proceso por tandas al que sirve la bomba. Un ejemplo típico es el uso de bombas centrífugas en un sistema desincrustedante de una laminadora de acero,

en el que la descarga por las boquillas de descarga se interrumpe entre láminas de acero consecutivas.

5) Un sistema servido por una batería de varias bombas operando en paralelo, y la cantidad de caudal necesario ha disminuido a un punto en el cual la descarga de una o más bombas puede reducirse a cero, para permitir que las otras bombas operen en un punto más económico de sus curvas características.

6) Han ocurrido dificultades mecánicas en la bomba, en su impulsor motriz o en alguna parte del sistema sobrecarga del impulsor, sobrecalentamiento de un motor eléctrico o de la bomba, sobre velocidad de una turbina de vapor, tubería rota en el sistema y cosas por el estilo.

Los controles que interrumpen el flujo o que lo reanudan pueden subdividirse en dos clases separadas:

a) Controles para arrancar o parar el impulsor (arranque / paro).

b) Controles que abren o cierran una válvula en el curso de flujo (válvula de estrangulación).

Cada una de estas dos clases de controles puede dividirse aún más, en fuente del impulso y medio de control. Estas subdivisiones están relacionadas con la función principal de los controles, porque el origen del impulso es creado por la razón que dicta la interrupción o la reanudación del flujo. Los impulsores pueden arrancarse o pararse por diversos controles, como se tratará más adelante.

Controles de botón de presión para motores eléctricos:

Los controles de botón de presión se usan mucho porque este método solo requiere que el operador este enterado de la necesidad de interrumpir o reanudar el flujo.

I.5.2. Interruptor de flotador.

Los interruptores de flotador pueden aplicarse para mantener ciertos niveles máximos y mínimos predeterminados en tanques o depósitos en los que se descargan líquidos, o de los que se sacan líquidos con bombas centrifugas movidas por motor eléctrico. En esta aplicación, un interruptor de flotador hace un contacto eléctrico cuando el nivel del

depósito llega a la altura predeterminada y se arranca el motor de la bomba. Cuando el nivel del depósito llega a la otra altura predeterminada, se abre el contacto y el motor de la bomba se para. La misma función puede desempeñarse con electrodos sensibles al nivel conectados con reles que cierren o abran circuitos eléctricos.

I.5.3. Interruptor de presión.

Los interruptores de presión son similares en principio a los interruptores de flotador pero son operados por cambios en la presión y se usan para mantener presión o vacío, dentro de ciertos límites seleccionados en un sistema o en un tanque cerrado. Generalmente, la presión que se va a controlar se aplica a un diafragma que acciona un interruptor. Cuando la presión del sistema o del tanque alcanza un valor predeterminado, cambia la presión del diafragma, se cierra un contacto eléctrico y el motor arranca. Cuando la presión llega al otro valor predeterminado, se abre el contacto y el motor se para.

Los interruptores de presión pueden algunas veces usarse en lugar de los de flotador, pues pueden arreglarse para mantener niveles de tanques o depósitos. Un método de empleo de interruptores de presión usa la carga estática del fluido en el recipiente como fuente de variación de presión. En otro método, se atrapa cierta cantidad de aire en un tanque cerrado; la presión del aire varía directamente con el nivel del líquido.

I.5.4. Controles de consumo de energía.

Un control de consumo de energía puede usarse para parar una unidad cuando el impulsor motriz se ha sobrecargado por cualquier causa. Este tipo de control puede también aplicarse para parar la unidad cuando la bomba ha perdido succión y está operando seco. En este caso la carga de corriente inversa parará un motor eléctrico tan pronto como la toma de corriente (es decir, el consumo de energía) haya bajado al 50% del valor mínimo de oración normal.

I. 5.5. Control de termostato.

Los controles de termostato se usan en muchas aplicaciones de bombas centrífugas, especialmente en procesos industriales en los que se deben alcanzar o mantener ciertas temperaturas precisas por medio de transmisión de calor, recirculación o un método similar. En esos casos, se puede aplicar un control de termostato en la misma forma que un interruptor de presión o flotador; sin embargo, los niveles de temperatura sustituyen a los niveles estáticos o a las diferencias de presión.

I.5.6. Gobernadores de sobre velocidad.

Los gobernadores de sobre velocidad se aplican principalmente a impulsores de turbinas de vapor, aunque también pueden controlar máquinas de combustión interna o turbinas hidráulicas cuando se usan para mover bombas centrífugas. Los gobernadores sirven para proteger al impulsor, a la bomba y al sistema en el que opera la bomba. Tanto la bomba como el sistema pueden sufrir daños si el impulsor posee suficiente fuerza para mover la unidad a velocidades suficientemente altas para generar presiones excesivas. Un uso típico del gobernador de sobre velocidad es el que acciona una válvula en la entrada de vapor de la turbina y generalmente está ajustado para sacar la turbina de la línea, si la velocidad de operación excede en un 5 a 10% la velocidad de operación de diseño.

I.5.7. Interrupción completa de flujo sin parar la unidad.

Muchas instalaciones requieren la interrupción y reanudación del flujo sin parar la unidad. Esto puede ser necesario porque las variaciones en la demanda son muy frecuentes para que ameriten parar la unidad; porque poner en marcha al impulsor es un proceso muy largo y complejo, una vez que la unidad se ha parado; o porque la interrupción del flujo parando el impulsor no evita posibles efectos perjudiciales, como el flujo inverso a través de la bomba. El flujo puede interrumpirse o reanudarse por la posición de una válvula sin afectar la operación del impulsor como sigue:

I.5.7.1. Controles manual de la válvula de descarga.

Algunas instalaciones requieren que la unidad este operando continuamente, como medida de seguridad, aún cuando no exista una demanda de flujo de descarga. Una válvula de compuerta, globo o macho, puede colocarse en la descarga de la bomba para ajustarse manualmente suspendiendo completamente el flujo. Este es un arreglo frecuente cuando varias unidades están operando en paralelo y cuando una o más de ellas están instaladas para trabajo de relevo. Esta forma de control requiere una línea de desvío para evitar que la bomba se sobrecaliente cuando está operando con la descarga cerrada. En muchos casos, especialmente con arrancadores de motor eléctrico sobre la línea, la unidad puede ponerse a trabajar más aprisa arrancando el motor que manipulando una válvula en la descarga. Por lo tanto cuando el factor tiempo es importante, es preferible arrancar y parar el motor, en lugar de manipular válvulas de descarga, lo que si se hace muy aprisa puede causar golpes de ariete.

1) Válvulas de retención en la descarga: Las válvulas de retención se usan casi universalmente en las líneas de descarga de las bombas centrífugas. Una válvula de retención actúa para proteger a la bomba, a su impulsor y a la parte de succión del sistema contra posibles daños causados por flujo en sentido inverso, si la carga externa en la descarga del sistema excede a la carga generada por la bomba, o si la bomba se para y no genera carga alguna. El flujo inverso en una bomba puede hacerla operar como una turbina hidráulica que gira en sentido opuesto a la dirección normal de rotación; por lo tanto, si el impulsor no es adecuado para esta operación inversa, puede dañarse seriamente. Aunque ni la bomba ni el impulsor se dañaran, se puede ejercer presiones excesivas en la tubería y accesorios de succión. Una válvula de retención es completamente automática en su operación, cerrándose cuando ocurren condiciones adversas y volviéndose a abrir de inmediato al restablecerse las condiciones normales.

2) Válvulas de control de flotador. Las variaciones de niveles de succión o descarga pueden transmitirse a una válvula operada mecánica o eléctricamente en la descarga de la bomba para desempeñar básicamente la misma función que un interruptor de flotador. Generalmente se usa este tipo de válvula para acción reguladora, pero puede proveerse con un mecanismo que abra o cierre la válvula completamente.

3) Válvulas de control de presión. La válvula de control de presión guarda la misma relación con los interruptores de presión que las válvulas de control de flotador tienen con los interruptores de flotador. Sin embargo, una aplicación específica difiere algo en su funcionamiento fundamental, esto es, el uso de válvula de control de presión como válvula de alivio. Muchas instalaciones requieren válvulas de seguridad como protección contra, ya sea la acumulación excesiva de presión por la operación a flujo reducido, o contra la sobrecarga de un impulsor en el mismo grado de condiciones de operación cuando la curva de consumo de fuerza se eleva bruscamente con la carga desarrollada.

4) Válvulas de control con termostato. Las válvulas de control con termostato utilizan las variaciones de temperatura para abrir o cerrar las válvulas de descarga en lugar de operar sobre el impulsor en sí.

Las tres últimas aplicaciones de control son raras, excepto cuando desempeñan la función adicional de modificar las condiciones de operación de la bomba en un amplio margen y cuando, incidentalmente, se les permite desplazarse a la posición de cierre total si las condiciones, impuestas exteriormente, así lo requieren. Esta fase de su operación se considerará mas tarde. Es importante que a una bomba centrífuga nunca descargue completamente cerrada y se suministre una línea de desvío de recirculación siempre que un control posicionador de válvula interrumpa completamente el flujo de descarga.

I.5.8. Variación de las condiciones de operación.

Existen tantas razones que pueden requerir una variación de las condiciones de operación como las que requieren una interrupción o reanudación de flujo. Algunas de estas son:

1) La necesidad de mantener un nivel constante, ya sea en el depósito de succión o descarga, cualquiera que sea la variación de suministro o demanda. Un ejemplo típico de este requerimiento es el sistema moderno de alimentación de agua a las calderas,

en el que se debe mantener un nivel constante en la caldera, cualquiera que sea la fluctuación de la carga impuesta a ella.

2) La necesidad de mantener una velocidad de flujo constante con diferencias variables de elevación estática entre la fuente de suministro y la descarga final. Estas condiciones ocurren con más frecuencia cuando una bomba centrífuga toma succión de una masa de agua sujeta a variaciones de marea.

3) La necesidad de mantener una presión constante en un sistema, o un margen de presión constante sobre una presión específica, cualquiera que sea el flujo total dentro del sistema.

4) La necesidad de mantener una temperatura constante en un proceso de tandas por medio de enfriamiento o calentamiento por permutadores de calor, sin tomar en cuenta las variaciones de temperatura del medio enfriador o de calentamiento.

Puesto que las condiciones de operación de una bomba centrífuga se establecen por la intersección de la curva carga-capacidad a la velocidad de operación y la curva de carga del sistema como se describió anteriormente, se advierte que la variación de las condiciones de operación puede obtenerse por cualquiera de estos dos métodos: modificación de la curva de carga-capacidad de la bomba; o modificación de la curva de carga del sistema.

5) Modificación por variación de velocidad.

La curva de carga-capacidad de la bomba se modifica por variación de la velocidad de la bomba excepto en aplicaciones muy esporádicas en las que la curva de carga-capacidad se modifica por medio de cambios mecánicos de la relación entre las partes interiores de la bomba mientras que la bomba está en operación.

La velocidad de la bomba se puede cambiar ya sea modificando la velocidad del impulsor de la bomba en sí o aplicando un mecanismo de transmisión de fuerza de velocidad variable, como un acoplamiento hidráulico o un arrastre magnético entre la

bomba y su impulsor. El propio mecanismo de control generalmente no se afecta por la selección de cualquiera de estas dos formas de cambio de velocidad.

Esta selección, por regla general, la dicta la preferencia del tipo de impulsor motriz más apropiado para la instalación y la economía relativa de las muchas combinaciones posibles de impulsores. Si se usan motores eléctricos, la operación de velocidad variable puede generalmente obtenerse solo con motores de corriente directa o motores de corriente alterna de embobinado con anillo colector.

En unos cuantos casos aislados los motores de inducción de jaula de ardilla pueden operarse a velocidades variables, variando la frecuencia. Las turbinas de vapor y las máquinas de combustión interna se prestan muy bien a la variación de velocidad y, por lo tanto, rara vez se conectan a la bomba impulsada por medio de mecanismos de transmisión de velocidad variable.

I.5.9. Modificación con la posición de las válvulas.

En la mayoría de las instalaciones es imposible o poco práctico cambiar la velocidad de operación de la bomba, y es necesario cambiar la forma de la curva de carga del sistema, haciendo variar uno de sus componentes con objeto de modificar las condiciones de operación. En este caso, ni la presión del terminal ni la diferencia de nivel estático puede esperarse que permitan variación, y la única solución posible consiste en variar la pérdida de carga por fricción en alguna parte del sistema. Debe introducirse una causa artificial de pérdida por fricción, como una válvula. Esta pérdida por fricción se controla con la posición de la válvula. Esta posición, a su vez, se controla según la cantidad (capacidad, presión, nivel o temperatura) que se va a controlar.

I.5.10. Regulación de la capacidad de las máquinas centrífugas.

Para satisfacer las demandas del sistema al que esté acoplado la máquina centrífuga, es necesario que ésta sea capaz de variar sus parámetros de trabajo dentro de ciertos límites manteniendo un alto rendimiento. Para lograr esto, los diseñadores tratan de

obtener modelos que garanticen, para las máquinas sometidas a regímenes variables de trabajo, características de rendimientos altas y planas.

Para las máquinas que trabajan en condiciones estables de operación se busca que el rendimiento sea lo más elevado posible en el punto de operación, como se muestra en la **Figura I.6.**, curva2.

La zona de trabajo óptimo de una máquina centrífuga se define como la variación de gasto que queda en el entorno de $0,9 N_{\max}$.

En la **Figura I.6.** se observa que la curva 1 tiene una zona de trabajo óptimo mayor que la curva 2.

Estos criterios deben tenerse en cuenta al seleccionar la máquina y sistema de regulación de la máquina para una aplicación dada, ya que una máquina de alto rendimiento puede resultar ineficiente si se opera fuera de su zona de trabajo óptimo durante la mayor parte de su tiempo de explotación.

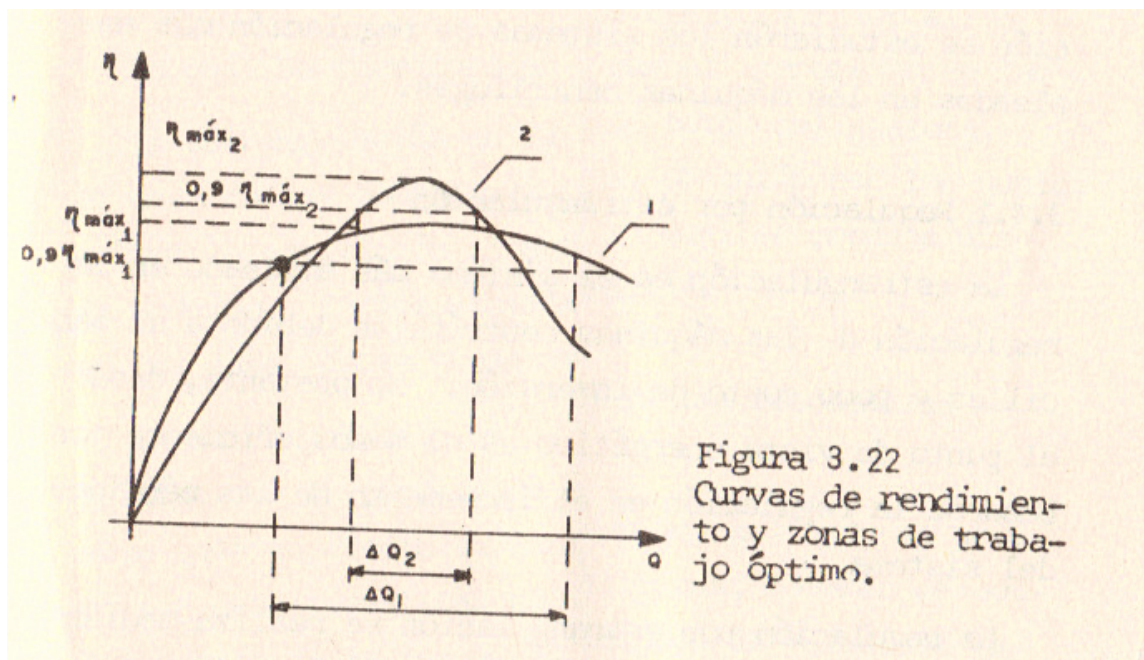


Figura I.6: Curvas de rendimiento y zonas de trabajo óptimo.

I.6. Variadores de velocidad o reguladores de frecuencia.

Las posibilidades y ventajas que ofrecen los reguladores de frecuencia o de velocidad como dispositivo de control que energiza, protege y permite la variación de velocidad del motor y la carga sin ningún accesorio extra entre el motor y la carga, contribuyendo al control del proceso y al incremento de la eficiencia energética de los sistemas de bombeo.

Entre las diversas ventajas en el control del proceso proporcionadas por el empleo de variadores de velocidad destacan:

- Operaciones más suaves.
- Control de la aceleración.
- Distintas velocidades de operación para cada fase del proceso.
- Compensación de variables en procesos variables.
- Permitir operaciones lentas para fines de ajuste o prueba.
- Ajuste de la tasa de producción.
- Permitir el posicionamiento de alta precisión.
- Control del Par motor (torque).

La ventaja principal de los variadores de velocidad es que disminuyen los consumos de energía eléctrica en algunos de los procesos que controla, dando como resultado considerables disminuciones en los costos de operación.

El suministro de voltaje desde un variador de velocidad puede realizarse a frecuencias que van desde 0 Hz hasta 120 Hz o más; por lo tanto, la velocidad del motor es variable en la misma proporción en que cambia la frecuencia; así el motor puede girar lento o muy rápido, según la frecuencia suministrada por él.

Al mismo tiempo, el voltaje también es variable en la misma proporción que la frecuencia, para asegurar que la relación voltaje / frecuencia se mantenga en el mismo

valor en todo el rango de velocidades, mientras no pase de 60 Hz. Esto se hace porque el par que proporciona el motor está, por diseño, determinado por esta relación.

Así un motor de 460 V tendrá una relación voltaje / frecuencia de 7,6. Si operamos este mismo motor a una frecuencia de 30 Hz, tendremos que suministrarle un voltaje de 230 V para mantener la misma relación y el mismo par. Cualquier cambio en esta relación puede afectar el par, la temperatura, la velocidad o el ruido que produce el mismo.

La instalación de los reguladores de velocidad se origina de dos causas principales; el mejoramiento en el proceso y en el ahorro de energía eléctrica; la instalación de los mismos puede conllevar los dos fines o uno solo; para esto es importante conocer los procesos industriales y las necesidades de los mismos, y eso implica conocer los tipos de clases de cargas que existen, que se dividen en tres, básicamente y son las siguientes:

- Par constante (En transportadores, elevadores, compresores de émbolo).
- Par variable (En bombas, ventiladores).
- Potencia constante (En máquinas herramientas, troqueladoras, dobladoras).

Otras ventajas de los reguladores de velocidad como método de control son que se puede eliminar de la inversión inicial cualquier tipo de arrancador y protección del motor, pues estos desarrollan ambas funciones, inclusive mejoran cualquier tipo de arranque y protección; ya que estas operaciones son programables y evitan los picos de arranque al hacerlo suavemente, por consiguiente eliminan las presiones excesivas y golpes de ariete en tuberías, así como los esfuerzos a que se someten los elementos mecánicos que se tendrían en un arranque a tensión plena o reducida, se requieren menos bombas, en donde para regular el flujo, se usan de diferentes capacidades en paralelo operando en turnos, siendo la inversión menor, se disminuyen los costos de mantenimiento pues los equipos acoplados se someten a un menor desgaste, las cargas estática y dinámica son menores comparadas con un control intermitente de arranque / paro, en algunos casos se puede llegar a duplicar la vida útil de los equipos.

En términos generales, puede decirse que existen tres tipos básicos de variadores de velocidad:

- Mecánicos.
- Hidráulicos.
- Eléctricos - Electrónicos.

Dentro de cada tipo pueden encontrarse más subtipos, que se detallarán a continuación. Cabe aclarar que los variadores más antiguos fueron los mecánicos, que se emplearon originalmente para controlar la velocidad de las ruedas hidráulicas de molinos, así como la velocidad de las máquinas de vapor.

Los variadores de velocidad mecánicos e hidráulicos generalmente son conocidos como transmisiones cuando se emplean en vehículos, equipo agroindustrial o algunos otros tipos de maquinaria:

Variadores mecánicos

- Variadores de paso ajustable.
- Variadores de tracción

Variadores hidráulicos

- Variador hidrostático.
- Variador hidrodinámico.
- Variador hidrovicosos

Eléctrico-electrónicos: Incluyen tanto el controlador como el motor eléctrico, sin embargo es práctica común emplear el término variador únicamente al controlador. Los primeros variadores de esta categoría emplearon la tecnología de los tubos de vacío. Con los años después se han ido incorporando dispositivos de estado sólido, lo cual ha reducido significativamente el volumen y costo, mejorando la eficiencia y confiabilidad de los dispositivos.

Variadores eléctrico-electrónicos

- Variadores para motores de corriente continua.
- Variadores de velocidad por corrientes de Eddy
- Variadores de deslizamiento
- Variadores para motores de corriente alterna conocidos como variadores de frecuencia

1.7. Problemática nacional relacionada con la selección y explotación de equipos de bombeo.

En trabajos realizados solicitud del MINAZ de la región central relacionados con la operación de los sistemas de bombeo, se determinó que la situación actual, no es la mejor, existiendo grandes problemas de selección, operación y mantenimiento.

Algunos de los aspectos más importantes serán relacionados a continuación:

- Existe una gran diferencia entre los parámetros carga (H) y flujo (Q), requeridos (r), de diseño (D) y operación (op). Una bomba que trabaja a carga o capacidad muy diferente a la especificada por el fabricante sufre deterioro y su vida útil se acorta considerablemente, por ejemplo, en el CAI "Antonio Finalet".

$$H_r = 126\text{m}$$

$$H_{op} = 209\text{m} \quad H_D = 183\text{m}$$

$$Q_r = 281 \text{ gpm} \quad (0.0177\text{m}^3/\text{s})$$

$$Q_D = 599.2 \text{ gpm} \quad (0.0377\text{m}^3/\text{s})$$

- La eficiencia de operación η_{op} es mucho menor que la de diseño η_D . Ejemplo, en el CAI "Heriberto Duquesne".

$$\eta_D = 74\% \quad \eta_{op} = 35\%$$

El rendimiento de trabajo es menor que el máximo en un 50 %, solo por este hecho se aumenta considerablemente el consumo de potencia de estos equipos.

- La potencia que se requiere para la alimentación de agua a los generadores de vapor en las provincias centrales es de 2072 kW y realmente se consume en esta operación 3810 kW lo cual arroja una pérdida de 1738 kW.
- Unidades motrices con potencias nominales que duplican las del equipo de bombeo, aun estando este sobredimensionado.
- Equipos trabajando con problemas de cavitación.
- Existe una gran diversidad de equipos de bombeo en los CAI de las provincias centrales así como 39 marcas de bombas de seis países (en un mismo CAI existen tres marcas diferentes de bombas para las mismas condiciones de operación). Esto a su vez dificulta la elaboración de los índices de rotura que más tarde servirán para establecer mínimos y máximos en los almacenes, así como determinar las verdaderas necesidades a contratar y de esta forma disminuir el costo y la duración de las reparaciones.
- No siempre existe una clara visión de la importancia del mantenimiento. Para muchos el mantenimiento no es más que la solución de la problemática que a determinado una rotura o parada de un equipo, para otros el mantenimiento se limita a la lubricación (que no siempre es la mejor), o el de apretar una empaquetadura; y realmente esto no es más que una de las partes integrantes de lo que debe ser el mantenimiento en una unidad de bombeo.
- No existe documentación técnica para la instalación, operación y mantenimiento del equipo.
- La forma de las características no están seleccionadas de acuerdo con lo establecido para este tipo de servicio.

Aunque se han citado algunos ejemplos, esta problemática es común en la mayoría de los sistemas de alimentación de agua a generadores de vapor de la región central.

Un problema muy frecuente y poco tratado en estas instalaciones es la selección inadecuada del método de regulación de flujo a emplear en estos sistemas, provocando sobreconsumos excesivos de energía. Un ejemplo muy claro de esta situación lo constituye el empleo del método de regulación por recirculación, provocando incrementos en más de un 50% de los consumos de potencia.

Las causas de todos estos problemas son similares y una de ellas lo constituye el hecho de que estas tareas de selección, normalización, diseño, e incluso, la explotación del equipo, no se lleve a cabo en todos los lugares con la seriedad que se requiere, motivado por:

- La complejidad y el volumen de los cálculos correspondientes.
- La no existencia por parte de los ingenieros y especialistas de conocimientos profundos y habilidad sistemática en el desarrollo de estas tareas.

Otro aspecto es la no existencia de herramientas que contribuyan a la realización de un análisis eficiente, es decir, obtener resultados de gran calidad en breve tiempo. Por tales motivos muchos analistas recurren a soluciones empíricas, basadas en criterios técnicos y en teorías que carecen de una base científica, trayendo consigo sobredimensionamientos y diseños inadecuados.

Para dar solución a toda esta problemática se requiere de la creación de métodos y procedimientos de cálculo para la selección y normalización. Estos métodos y procedimientos deben estar elaborados sobre la base de normativas y criterios técnico-económicos de selección correctamente elaborados, así como la aplicación de herramientas de cálculo que permitan determinar las variaciones permisibles en el flujo y la carga sin afectaciones considerables en el rendimiento.

En la literatura numerosos autores abordan la temática de selección de bombas centrífugas, Church, Nestor Ramos y muchos más abordan esta temática. Karassik realiza un análisis más profundo y detallado de los factores de tipo operacional a tener en cuenta en la selección de estos equipos. La aplicación de estos métodos a un caso particular tiene algunas limitantes:

Ejemplo:

Para un caso sencillo donde se requiera seleccionar un equipo para determinados requerimientos de flujo, carga y condiciones de operación, existen múltiples variantes de diseños de equipo de bombeo con disímiles características constructivas, velocidad de rotación etc.

Aunque muchos especialistas no le dan el peso que requiere la selección de las características constructivas del equipo de bombeo (número de etapas, tipo de succión) y su velocidad de rotación, estas tienen gran influencia no solo en el costo inicial del equipo, sino también en la velocidad específica del mismo (la forma de sus características de trabajo). La forma de la característica de una bomba de baja velocidad específica no es recomendada para determinadas aplicaciones y en otras ocurre todo lo contrario.

El cálculo de la velocidad específica se realiza a partir de la ecuación siguiente:

$$N_s = 3.65 \cdot n \frac{\sqrt{\frac{Q_D}{s}}}{\left(\frac{H_D}{i}\right)^{3/4}}$$

Donde:

N_s - Velocidad específica del equipo de bombeo.

n - Velocidad de rotación (r/min).

$s=1$: Simple succión.

$s=2$: Doble succión.

i - Número de etapas.

Conclusiones parciales.

1. Para las máquinas que trabajan en condiciones de operación se pretende que el rendimiento sea lo más elevado posible en el punto de operación.
2. Estos criterios deben tenerse en cuenta al seleccionar la máquina y sistema de regulación de flujo para una aplicación dada, ya que una máquina de alto rendimiento puede resultar ineficiente si se opera fuera de su zona de trabajo óptimo durante la mayor parte de su tiempo en explotación.
3. De aquí que los sistemas de regulación sean medios necesarios de regulación de gastos.

Capítulo II

Capítulo II. Características hidráulicas y energéticas del Sistema de Bombeo.

El sistema que sirvió de base al proyecto está relacionado con el flujo de agua que se utiliza para alimentar los generadores de vapor de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”. Ésta planta ofrece servicios auxiliares a otras pertenecientes al sistema de refinación de petróleo en la medida en que estas lo requieran para efectuar sus producciones o brindar sus servicios. El proyecto acometido se realiza en condiciones de mayor consumo de vapor, por ende de mayor consumo de agua. Los generadores de vapor logran aumentar su producción hasta 20 toneladas cuando la totalidad de las plantas están solicitando servicio de vapor, sobre todo la planta de refinación si sus calderas recuperadoras salen del sistema.

Para el estudio de las instalaciones de bombeo se aplicaron metodologías para la obtención de las curvas energéticas de bombas centrífugas desarrolladas en tesis anteriores.

II.1. Desarrollo de una metodología para la obtención de las curvas energéticas de las bombas centrífugas en condiciones de campo.

Para la obtención de las curvas energéticas reales en condiciones de campo se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Conexión en la instalación de un analizador de redes digital para determinar todos los parámetros de la corriente eléctrica a la entrada del motor.
2. Conexión de un medidor de flujo ultrasónico digital a la descarga de la bomba para medir el flujo que entregaba la bomba.
3. Puesta en marcha de la instalación con los dos equipos conectados a la vez.
4. Se hicieron diez corridas de toma de datos; cada cinco minutos se registraron cada uno de los parámetros eléctricos y 10 valores de flujos con la bomba trabajando al 100 % de su capacidad, estas mediciones los equipos las registran en memoria automáticamente, de manera sincronizada. A la vez se toma la

lectura del manómetro situado a la descarga cada cinco minutos y se miden las revoluciones por minutos (rpm) en eje del motor con un tacómetro óptico.

5. Se estranguló la válvula situada en la descarga de la bomba cada cinco minutos, hasta el cierre con el registro también de todos los parámetros anteriores.
6. Utilización del Programa Matlab versión 7.0.4 para la obtención de la potencia en el eje de las bombas con mediciones en condiciones de campo con el método desarrollado por el Dr. J. Gómez¹.
7. Procesamiento de toda la información obtenida.

II.2. Metodología para la obtención de las curvas energéticas de las bombas a partir de los datos de chapas de las mismas.

El procedimiento a emplear para determinar estas curvas es el siguiente:

1. Toma de los datos de chapa de la bomba, en caso de que estos no existan se pueden calcular a partir de las dimensiones del impelente.
2. Cálculo de la velocidad específica por medio de la ecuación:

$$n_s = \frac{r.p.m.\sqrt{Q}}{H^{3/4}},$$

3. Donde el flujo se da en galones por minuto y la carga en pie, por ser unidades específicas del gráfico de la **Figura II.1**.
4. Con este valor de velocidad específica calculado se puede determinar la eficiencia de la bomba a partir del gráfico que se muestra en la **Figura II.1**.
5. Cálculo de la potencia en el eje a partir de la ecuación:

¹ Gómez Sarduy, Julio Rafáel. Determinación de la Eficiencia de los Motores Asíncronos en Condiciones de Campo. Marcos Alberto de Armas Teyra, tutor. – Tesis para Optar por el Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, ISTE (V.C), 2 006. – 93 h.: ilus.

$$N_{eje} = \frac{\rho * g * Q * H}{10^3 * \eta_{bomba.}},$$

Donde:

ρ , densidad del fluido a temperatura ambiente (kg/m³).

g , aceleración de la gravedad (m/s²)

Q , flujo de la bomba (m³/s).

H , carga de la bomba (m).

$\eta_{bomba.}$, eficiencia de la bomba.

N_{eje} (kW).

6. Con estos valores de Flujo, Carga, Potencia en el eje y rendimiento que corresponde al trabajo de la bomba al 100 % de su capacidad y los gráficos mostrados en las Figuras 2.2, 2.3 y 2.4 para a partir de los porcentajes de flujo hallar los porcentajes de carga, potencia y eficiencia y obtener así los restantes valores para la construcción de las curvas, se procede a la construcción de la característica ideal, utilizando el Microsoft Excel.

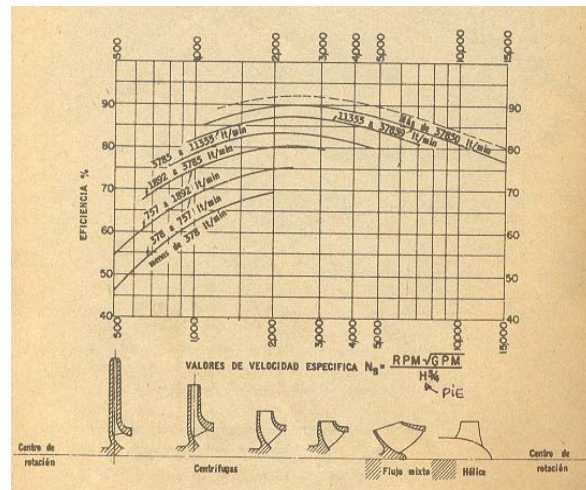


Fig. II.1: Relación aproximada entre las formas de impulsores y variaciones de eficiencia con la velocidad específica².

² Karassik, Igor J. Bombas Centrífugas, selección, operación y mantenimiento/. – [s.l.]: Edición Revolucionaria, 1 985. — t1. p. 242.

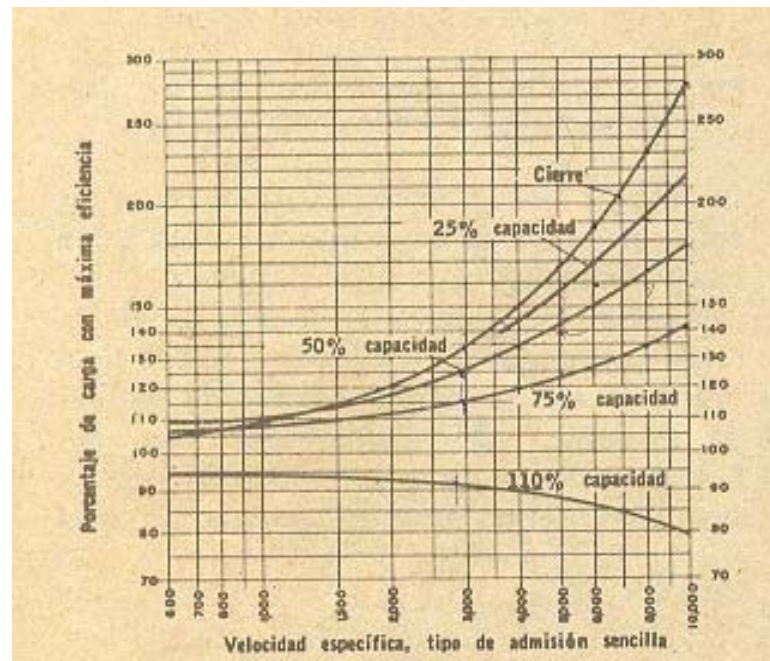


Fig. II.2: Variación de los valores de carga al cierre, 25, 50, 75 y 110 % de capacidad con la velocidad específica³.

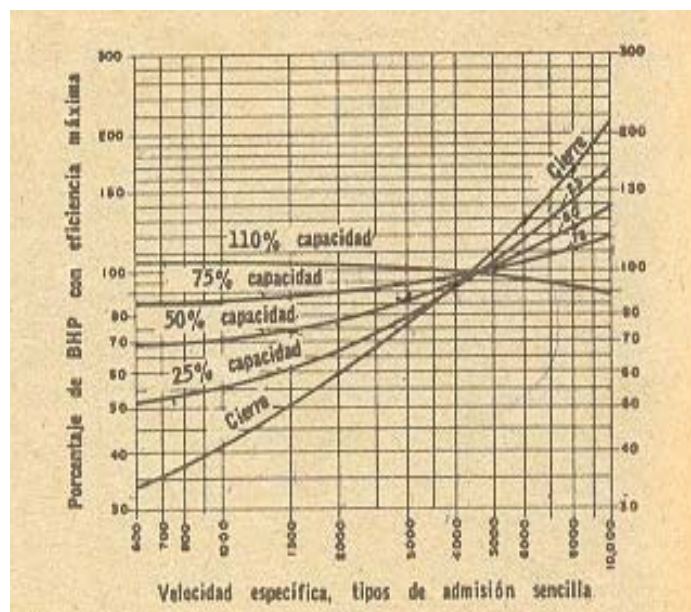


Fig. II.3: Variación de los valores de potencia al cierre, 25, 50, 75 y 110 % de capacidad con la velocidad específica⁴.

³ Ibidem, t1. p. 244.

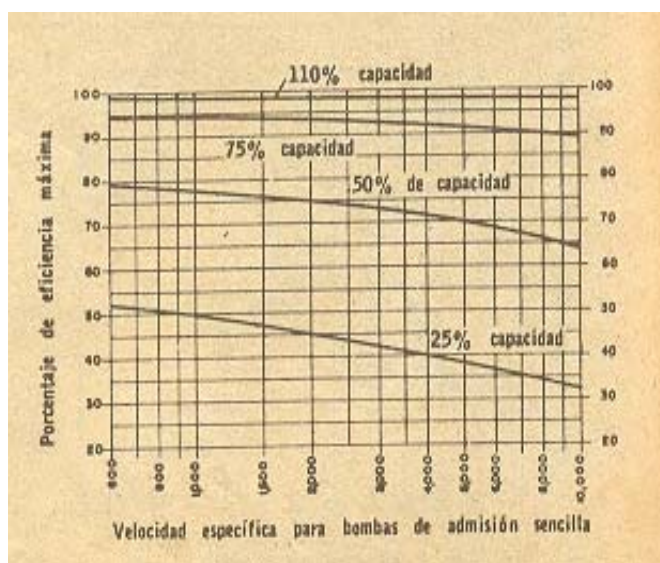


Fig. II.4: Variación de los valores de eficiencia al cierre, 25, 50, 75 y 110 % de capacidad con la velocidad específica⁵.

II.3. Cálculo de la carga del sistema.

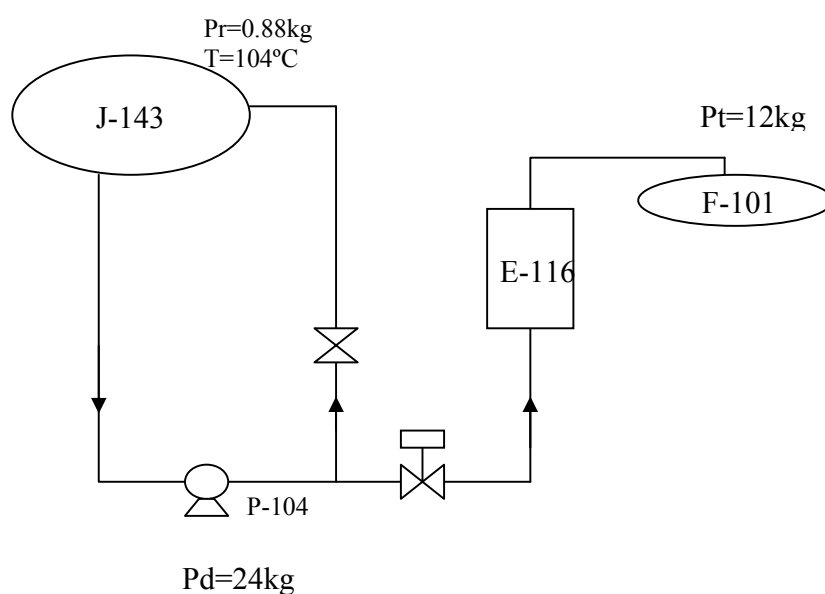


Fig. II.5: Esquema de la instalación de bombeo que suministra el agua a caldera.

⁴ Ibidem, t1. p. 244.

⁵ Ibidem, t1. p. 244.

Se aplicó la ecuación de Bernoulli desde el desaireador hasta la succión de la bomba.

$$\frac{P_1}{\rho \times g} + \frac{V_1^2}{2 \times g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho \times g} + \frac{V_2^2}{2 \times g} + Z_2 = H_{SIST}$$

$$H_{SIST} = \frac{P_2 - P_1}{\rho \times g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \times g} + \Delta Z$$

Las pérdidas están incluidas ya que se miden las presiones en los puntos extremos.

Donde:

H_{SIST} = Carga del sistema.

P = Presión

V = Velocidad

ρ = Densidad

ΔZ = Diferencia de altura

g = Gravedad

$$\begin{aligned} P_1 &= 0,88 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 86,29 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= 0,4 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 39,22 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\Delta Z = 6,60 \text{ m}$$

Las velocidades se desprecian porque los valores son pequeños.

$$H_{SIST} = \frac{P_2 - P_1}{\rho \times g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \times g} + \Delta Z$$

$$H_{SIST} = \frac{0,88 \frac{kg}{cm^2} - 0,4 \frac{kg}{cm^2} \times 10^4 \frac{cm^2}{m^2} \times 9,81 \frac{m}{s^2}}{967,9 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2}} + 6,60m$$

$$H_{SIST} = 11,6m$$

Se utiliza la ecuación de Bernoulli para el tramo desde la descarga de la bomba al domo de la caldera:

$$P_1 = 12 \text{ kg/cm}^2 = 1176,79 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 24 \text{ kg/cm}^2 = 2353,59 \text{ kPa}$$

$$\Delta Z = 4,68 \text{ m}$$

$$H_{SIST} = \frac{P_2 - P_1}{\rho \times g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \times g} + \Delta Z$$

$$H_{SIST} = \frac{24 \frac{kg}{cm^2} - 12 \frac{kg}{cm^2} \times 10^4 \frac{cm^2}{m^2} \times 9,81 \frac{m}{s^2}}{967,9 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2}} + 4,68m$$

$$H_{SIST} = 130m$$

$$H_{SIST} \text{ Total para } 13 \text{ t/h} = 141,6 \text{ m}$$

Con el cálculo anterior se logra un punto medio de la curva de la carga del sistema, aplicando el mismo procedimiento se obtienen los puntos extremos para flujo cero y para el punto de operación actual, siendo ambos de 124, 92m y 240 m respectivamente.

II.4. Cálculo de la carga de la bomba:

$$P_1 = 0,4 \text{ kg/cm}^2 = 39,22 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 23,8 \text{ kg/cm}^2 = 2255,53 \text{ kPa}$$

$$\Delta Z = 0 \text{ m} \text{ porque se encuentra al mismo nivel.}$$

Las pérdidas están incluidas en la lectura del manómetro.

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\rho \times g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \times g}$$

$$H_{Bomba} = \frac{23,8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} - 0,4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 10^4 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{967,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$H_{Bomba} = 244 \text{ m}$$

II.5. Mediciones realizadas para determinar la eficiencia de la bomba y el consumo del motor para 18 t/h de flujo.

A continuación se muestran los resultados de las mediciones reales obtenidas por la instalación de un analizador de redes digital (**Tabla II.1.**) para determinar todos los parámetros de la corriente eléctrica a la entrada del motor, además de tomar las lecturas en el terreno, mediante manómetros y un medidor de flujo ultrasónico digital (**Tabla II.2.**), conectado a la descarga de la bomba para medir el flujo que entregaba esta para una producción de Vapor de 18t/h:

Tabla II.1: Mediciones obtenidas con el analizador de redes y resultados obtenidos con el uso del programa Matlab versión 7.0.4.

Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	r/min	frecuencia	Pt
460,4914	459,6956	460,3184	88	88	88	1788	59,977	54400
459,315	458,45	459,142	87	88	88	1783	59,789	54100
458,8652	458,0002	458,8652	87	88	88	1786	59,82	53900
458,5538	457,6196	458,45	87	87	87	1783	59,704	53300
458,4846	457,585	458,4154	87	87	88	1786	59,891	53800

En la **Tabla II.1.** se pueden observar los parámetros medidos con el analizador de redes como son: voltaje en las tres líneas (medidos en Volt) los cuales se pueden observar en las columnas A, B y C, intensidad de la corriente en las tres líneas (medidos en Ampere) en las columnas D, E y F, las revoluciones por minuto de eje del motor medidas con el tacómetro óptico en la columna G y la frecuencia de la corriente (medida en Hertz) columna H. En la columna I se encuentra la potencia en el eje calculada a través del Programa Matlab versión 7.0.

Tabla II.2: Valores de las mediciones obtenidas con el flujómetro ultrasónico y el manómetro.

Flujo (l/s)	P. desc.(kg/cm ²)
21,2	23,8
21,5	23,6
21,9	23,7
20,4	23,7
20,3	23,8

II.5. Cálculo de la eficiencia de la bomba.

$$\eta = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{10^3 \times N}$$

Donde:

η = Eficiencia

ρ = Densidad

g = Gravedad

Q = Flujo

H = Carga del sistema

N = Potencia en el eje

De aquí que:

$$Q = 23,13 \text{ m}^3 / \text{h} = 0,0064 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$H = 244 \text{ m}$$

$$N = 52 \text{ kW} \text{ (por el método de Julio Gómez)}$$

$$\eta = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{10^3 \times N}$$

$$\eta = \frac{957 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0,0064 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 244 \text{m}}{10^3 \times 52 \text{ kW}}$$

$$\eta = 0,28$$

Debido a que la bomba del sistema de bombeo no incluía en su Ficha Técnica las curvas características, fue necesario para obtenerlas, emplear la Metodología utilizada en el Trabajo de Diploma del Ing. Marcos Consuegra a partir de los datos de chapa de

la misma, en la que se utilizó en Microsoft Excel un montaje de ecuaciones cuyo procedimiento se mostró anteriormente.

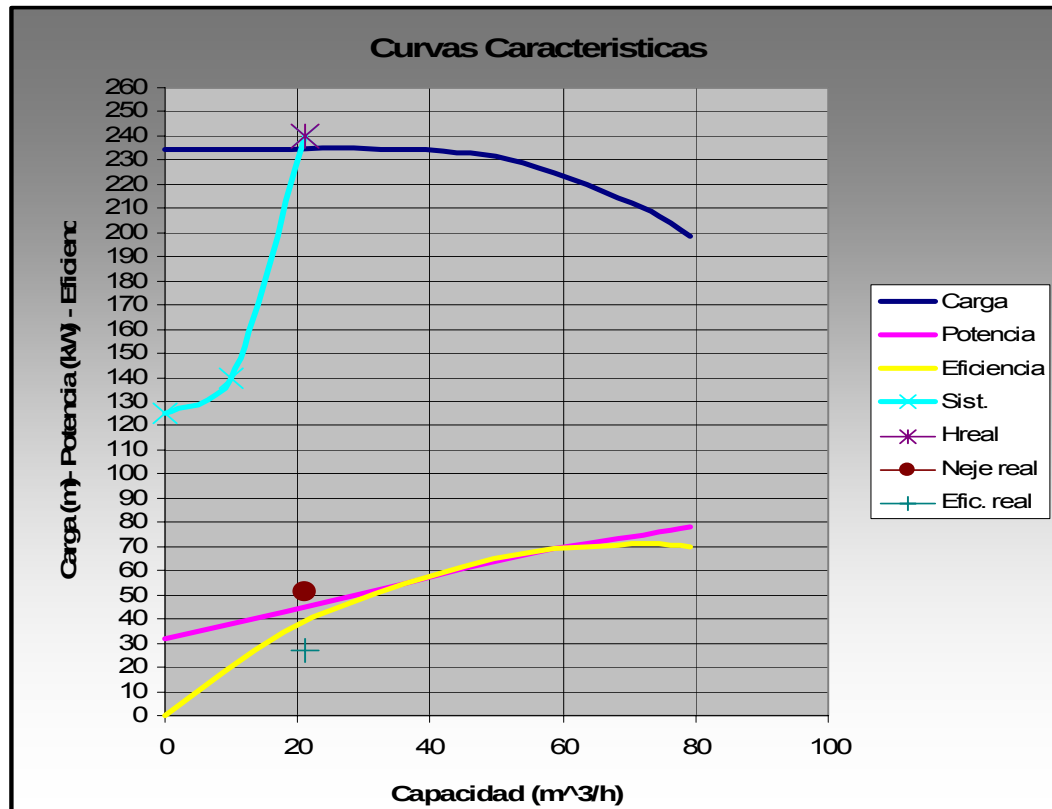


Figura II.6: Curvas energéticas de la bomba según datos de chapa, curva del sistema y puntos medidos en condiciones de campo.

II.6. Análisis de los resultados.

Del gráfico de las curvas características podemos obtener la siguiente información:

1. Índice de consumo de la estación (I.C).

$$IC = \frac{\frac{KW}{\frac{m^3}{h}}}{\frac{m^3}{h}} = \frac{52}{23,13} = 2,25 \text{ kWh} / m^3$$

2. Eficiencia de la Instalación.

$$\eta_{\text{instalación}} = \eta_{\text{motor}} * \eta_{\text{bomba}}$$

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{\text{Potencia Activa}}{\text{Potencia en el eje}} * 100$$

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{54,4\text{kW}}{52\text{kW}} \times 100$$

$$\eta = 69,3\%$$

$$\eta_{\text{instalación}} = \eta_{\text{motor}} * \eta_{\text{bomba}}$$

$$\eta_{\text{instalación}} = 0,69 * 0,28$$

$$\eta_{\text{instalación}} = 0,19$$

3. Energía gastada por la bomba.

$$\text{Energía Gastada} = N_{\text{Pot. eje.}} * \text{h/día de trabajo.}$$

$$\begin{aligned}\text{Energía Gastada} &= 52 \text{ kW} * 24 \text{ horas} \\ &= 1\,248 \text{ kWh/día}\end{aligned}$$

4. Energía perdida.

$$\begin{aligned}\text{Energía perdida} &= \eta_{\text{bomba}} * \text{Energía Gastada} \\ &= 0,19 * 1\,248 \text{ kWh/ día.} \\ &= 237,12 \text{ kWh/día.}\end{aligned}$$

5. Consumo de Kwh en un mes trabajando 24 horas al día.

$$\text{Consumo} = N_{\text{elect.}} * 24 \text{ h/día} * 30 \text{ días / mes}$$

$$= 1\,248 \text{ kWh/día} * 30 \text{ días/mes}$$

$$= 37\,440 \text{ kWh}$$

Conclusiones Parciales.

El trabajo realizado relacionado con la operación del sistema de bombeo del Sector Energético de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”, evidencia mediante los análisis y cálculos efectuados en la entidad, que la selección existente no fue la más apropiada, ya que la misma se encuentra sobredimensionada debido a que:

1. La instalación de bombeo tiene muy baja eficiencia, de un 19 %, producto de lo cual la bomba pierde 237,12 kWh/día.
2. Se hace necesario sustituir la bomba por otra más adecuada para esas condiciones de trabajo.

Capítulo III

Capítulo III. Soluciones para las deficiencias de operación del sistema de bombeo.

Antes de comprar equipos centrífugos de bombeo, un cliente debe hacer un análisis cuidadoso de todos los factores relativos a la instalación. Reunir todos los datos en forma de solicitud y enviarla a varios fabricantes de bombas, pidiéndoles que preparen descripciones detalladas del equipo que pueden recomendar para satisfacer sus necesidades particulares.

Es importante presentar una investigación completa de cada uno de los factores que se estudian cuando se prepara esta solicitud, es posible delinear los datos esenciales requeridos para que el fabricante pueda escoger inteligentemente una bomba centrífuga para cualquier instalación.

III.1. Datos esenciales requeridos para la selección de bombas.

Los siguientes representan los datos esenciales requeridos:

1. Número de unidades requeridas.
2. Naturaleza de los líquidos que se van a bombear.
 - Agua dulce o salada, ácido o álcali, aceite, gasolina, lechada, o pulpa para papel.
 - Presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.
 - Peso específico.
 - Condiciones de la viscosidad.
 - Cantidad de cualquier materia extraña suspendida que haya y tamaño, naturaleza y calidad abrasiva de los sólidos –si los líquidos son pastosos, consistencia ya sea en % o en kilogramos por metro cúbico de líquido.
 - Análisis químico, incluyendo el valor del pH, variaciones probables del análisis, impurezas, contenido de oxígeno, historia pasada, y tendencia a escamar, si la hay.
3. Capacidad requerida, así como cantidad mínima o máxima de líquido que debe descargar la bomba.
4. Condiciones de succión:



- Elevación o carga de succión.
 - Condiciones de succión constantes o variables.
 - Longitud y diámetro de la tubería de succión, accesorios y válvulas que tiene.
5. Condiciones de descarga.
 - Descripción de la carga estática –constante o variable.
 - Descripción de la carga por fricción y cómo se estimó.
 - Presiones máximas y mínimas de descarga contra las cuales la bomba tiene que descargar líquido.
 6. Tipos de servicio -continuo o intermitente.
 7. Instalación de la bomba -posición horizontal o vertical (si es vertical, tipo de foso –lleno o seco).
 8. Tipo y características de la fuerza disponible para mover la bomba.
 9. Espacio, peso, o limitaciones de transporte.
 10. Localización de la instalación.
 11. Requerimientos especiales o marcadas preferencias con respecto al diseño, la construcción o el funcionamiento de la bomba.

III.1.1. Número de unidades.

El número de unidades es importante, principalmente, para aumentar la confianza en las bombas; con frecuencia, son necesarias unidades de repuesto, especialmente en casos en los que la vida de la bomba puede estar expuesta a un servicio severo.

Es importante determinar si se pueden operar en paralelo una o más unidades porque el funcionamiento hidráulico de cada unidad independiente puede necesitar adaptaciones para ese objeto.

La selección entre el uso de una sola bomba y la instalación de varias bombas en paralelo para la demanda total está influenciada por el factor de carga supuesto. Cuando la demanda es más o menos constante, la tendencia es seleccionar una bomba para toda la demanda, agregando un margen de seguridad como remedio al desgaste de la bomba. Si, por otro lado, la carga es de naturaleza variable, se pueden operar dos o más bombas en paralelo. En períodos de carga baja, una o más bombas pueden sacarse de la línea para operación más eficiente. La capacidad de cada bomba se selecciona con este tipo de operación en mente. Por ejemplo, si la demanda permanece a 65% de la demanda máxima, la mayor parte del tiempo se podría instalar dos bombas, cada una diseñada para cerca del 70% del flujo máximo. Una sola bomba podría llevar la carga la mayor parte del tiempo. Cuando el requerimiento de flujo total excede al 65% del máximo, se pone en la línea la segunda bomba para repartir la carga.

Las excepciones a esta regla general son las siguientes:

Cuando la demanda total es demasiado baja para dividirla eficientemente entre dos bombas, puede usarse una sola bomba sin considerar el factor de carga, cualquiera que sea.

Cuando la eficiencia de la bomba sea poco importante –servicio intermitente o bombas movidas por turbinas que se usan para proporcionar vapor de escape para trabajos de proceso o para calefacción- el menor costo inicial, generalmente determinará el número de bombas que se usarán en la instalación.

Cuando la demanda máxima es muy grande para permitir el uso de la bomba más económica o de la velocidad de operación más económica, la demanda puede repartirse entre dos o más unidades, cualquiera que sea la naturaleza del factor de carga.

III.1.2. Naturaleza de los Líquidos.

Tipo. Hasta cierto punto la naturaleza del líquido bombeado determina los tipos de bombas más frecuentemente usados para el servicio de que se trata. Se cuenta con la más amplia variación para selección en servicio de agua, pero esta debe dividirse en agua dulce y agua salada. La selección de materiales para el servicio de agua salada varía grandemente desde el punto de vista de costo inicial, periodo de vida útil y preferencia y experiencia del comprador.

Impurezas aparentemente insignificantes en el líquido pueden ser un factor altamente importante en la selección de los materiales adecuados. Igualmente, la naturaleza del líquido que se va a bombear afectará mucho no sólo el material de la bomba, sino, posiblemente, hasta la construcción mecánica más apropiada para el servicio, dependiendo si el líquido es un ácido, álcali, o aceite. Por ejemplo, si la bomba va a manejar líquidos muy corrosivos, no sólo debe construirse la bomba con materiales resistentes a la corrosión, sino que debe evitarse que el ácido escape a la atmósfera por los estoperos.

III.1.2.1. Temperatura.

La temperatura del líquido bombeado es un factor muy importante. Una línea de bombas normales de servicio general tiene limitaciones definidas de temperatura. Las

más altas temperaturas pueden exigir el uso de materiales especiales, estoperos enfriados con agua o características especiales como el soporte de la cubierta en la línea de su centro. Para temperaturas extremadamente bajas, como en servicio de salmueras, el uso de un ferro-níquel fundido puede garantizarse que es mejor que el hierro gris normal, debido a que se puede obtener una estructura cristalina más refinada y así evitar fracturas.

Se debe conocer cualquier variación grande de la temperatura de operación porque afectará el peso específico y la gama de viscosidad del líquido manejado.

Si el líquido es agua, la presión de vapor puede determinarse fácilmente de tablas de vapor. Si se trata de cualquier otro líquido, la presión de vapor a la temperatura de bombeo debe anotarse cuidadosamente porque figura en forma importante para determinar si son o no satisfactorias las condiciones de succión existentes.

III.1.2.2. Peso Específico.

Se debe conocer el peso específico para poder determinar el consumo de fuerza en las condiciones de diseño y para solucionar el tamaño apropiado de impulsor. Una solicitud por una bomba frecuentemente expresa la descarga requerida o la presión neta en kg/cm^2 , que debe convertirse en metros de líquido manejado.

III.1.2.3. Viscosidad.

Cuando la viscosidad del líquido manejado es distinta a la del agua, la capacidad de la bomba, carga y consumo de fuerza se afectan apreciablemente por lo que son necesarios factores de corrección.

III.1.2.4. Materia extraña.

El tamaño y la naturaleza de los sólidos suspendidos en el líquido determinarán tanto el tipo de impulsor mejor adaptado para el caso como los materiales que se deben usar

para la construcción de la bomba. Si los sólidos son muy abrasivos, generalmente, se usan impulsores abiertos y cuando es necesario se pueden aplicar materiales especiales más resistentes al desgaste, más caros. Cuando los sólidos alcanzan cierto tamaño, o cuando son de naturaleza fibrosa, se requieren impulsores especiales que no se atascan.

III.1.2.5. Análisis químico.

Se debe prestar atención especial al análisis químico del líquido si sus propiedades corrosivas o electrolíticas no son fácilmente palpables por la descripción del propio líquido. Así la medida del pH (medida de acidez o alcalinidad) del agua siempre deberá establecerse si hay indicios visibles de que el agua no es neutra.

III.1.3. Capacidad requerida.

La capacidad requerida para la instalación deberá expresarse en litros por minutos a la temperatura de bombeo. Cualquier variación supuesta en el campo de capacidades deberá indicarse claramente porque las bombas centrífugas no permiten tanta flexibilidad en las variaciones de capacidad sin afectar la eficiencia de la bomba como en otros tipos de bombas, digamos, las reciprocantes de vapor. Además, es generalmente preferible que ocurra la eficiencia máxima de la bomba en las condiciones normales de operación o cerca de ellas.

Cualquier bomba centrífuga puede trabajar ocasionalmente a mucho más de su capacidad especificada, pero esto no siempre puede ser práctico o permisible. Un aumento de capacidad significa una disminución en la carga generada; esto puede evitar la operación de la bomba con sobrecargas de emergencia si no se incluyó en el diseño un exceso de capacidad y si la bomba opera en una curva de carga del sistema, ya que las pérdidas por fricción que constituyen parte de la carga requerida aumentarán con la capacidad. También puede quedar prohibido el bombeo de emergencia de sobrecapacidad si las condiciones de succión que prevalecen no dejan margen sobre las requeridas para la capacidad normal especificada. Finalmente, si aumenta el

consumo de fuerza con la capacidad, como sucede con la mayoría de las bombas centrífugas, la operación con capacidades mayores que las originalmente esperadas puede sobrecargar seriamente el impulsor de la bomba.

La información sobre la capacidad mínima de operación también es de gran importancia. En ciertos casos, la operación con capacidad extremadamente reducida, aún por períodos de tiempo muy cortos, es un peligro definitivo y debe evitarse.

En otras ocasiones, la única desventaja de operar a capacidades reducidas es una economía deficiente, y un análisis completo del problema puede dar por resultado la instalación de pequeñas unidades adicionales que se operarían durante períodos de poca carga.

III.1.4. Condiciones de succión.

Las condiciones correctas de succión para las bombas centrífugas son de primerísima importancia. A menos que la carga neta de succión positiva (NPSH) disponible sea igual a la requerida o mayor que la requerida por la bomba seleccionada a la capacidad de que se trata, la bomba estará incapacitada para ajustarse a sus condiciones de capacidad de diseño. Además la cavitación consiguiente dañará la bomba. Si se manejan líquidos fríos es necesario saber si hay carga en la succión o si la bomba operará con elevación de succión, y si es esto último, cuál será la elevación máxima.

Si el líquido es caliente o está a una presión cercana o igual a su presión de vapor, la bomba se deberá instalar con carga en la succión y la sumersión disponible debe describirse.

En todos los casos es conveniente determinar separadamente la diferencia estática entre el nivel del líquido y la línea de centro de la bomba y las pérdidas de fricción y de entrada en la tubería de succión. Si no se han determinado estas pérdidas, generalmente será suficiente describir con precisión el trazo de la succión, con una lista de todas las longitudes, tamaños de tuberías y válvulas.

III.1.5. Condiciones de descarga.

La carga de descarga para las condiciones de diseño deberá fijarse entendiendo que, generalmente, está compuesta de elevación estática (o presión) y pérdidas por fricción en la tubería de descarga. Cualquier variación en la carga estática debe conocerse para determinar la carga máxima y mínima contra la que se va a operar la bomba.

Si se especifica una carga total excesiva se tiene realmente el mismo efecto que especificando una capacidad excesiva. Puesto que una bomba centrífuga siempre operará en la intersección de su curva de carga-capacidad y la de carga del sistema, una bomba que desarrolla un exceso de carga, a menos que se estrangule artificialmente, descargará un exceso de capacidad ya que su curva de carga-capacidad cruzará la curva de carga del sistema a un flujo mayor.

Separando la carga de descarga en carga estática y de fricción, se pueden determinar cargas por fricción excesivas. Si la tubería que se va a usar es muy pequeña, la bomba necesaria y su impulsor serán más costosos de lo necesario y los gastos de operación serán más altos que si se usara el tamaño adecuado de tubería.

En ciertas aplicaciones especiales, a la bomba puede pedírsele que desarrolle presiones en exceso, de las condiciones de diseño, por períodos cortos. Un ejemplo típico es una bomba de circulación de agua a un condensador que se va a instalar en un sistema que utiliza un efecto de sifón. La carga que se va a desarrollar consiste sólo de las pérdidas por fricción en la tubería y en el condensador en sí, y por lo tanto, es bastante pequeña.

Sin embargo, con objeto de que la bomba de circulación de agua pueda descargar a través del condensador, el sistema debe cebarse o cargarse, es decir, el agua debe descargarse por el sifón.

El diseño de la bomba, por lo tanto, debe permitirle desarrollar una carga al cierre considerablemente más alta que la carga normal de operación.

En algunas instalaciones de bombas de circulación de agua al condensador, la carga necesaria antes de que se establezca el sifón puede afectar de tal manera la curva de características requeridas que la carga normal de operación ocurre en un punto de la curva en el que la eficiencia de la bomba es relativamente baja.

En un sistema de sifón, sin embargo, generalmente es posible eliminar el requerimiento de alta carga inicial incorporando un dispositivo productor de vacío. Este se conecta a la parte superior del sifón, de manera que el aire en el punto superior pueda evacuarse y establecerse el sifón con la bomba, produciendo una carga que no sea superior a la necesaria para la operación normal.

En muchos casos, un poco de estudio o la instalación de equipo adicional, relativamente barato, con frecuencia simplificará un problema de esta naturaleza.

III.1.6. Tipos de servicio.

El factor de carga, supuesto, de la instalación considerada, jugará un papel importante en la selección de la mejor bomba que se deba usar. El tipo de servicio afectará el número de unidades que cubran mejor los requerimientos de capacidad.

Si el servicio es intermitente, innecesario utilizar la bomba más eficiente disponible; la selección, generalmente, se hace sobre la base de costo inicial más bajo. Una bomba destinada a servicio continuo, sin embargo, deberá seleccionarse por su eficiencia, efectividad y larga vida.

III.1.7. Posición de instalación.

Mientras que la mayoría de las bombas centrífugas son unidas horizontales, ocurren circunstancias que hacen que una bomba centrífuga con un eje o rotación vertical sea más conveniente. Las bombas verticales pueden arreglarse ya sea para instalarlas en foso seco o lleno. Puesto que las bombas usadas para estas dos categorías son bastantes diferentes, es muy importante determinar cuál de las dos instalaciones es preferible.

III.1.8. Características de la fuerza motriz.

Mientras que las bombas centrífugas modernas, generalmente se mueven con motores eléctricos, turbinas de vapor, o motores de combustión interna, se usan muchos otros tipos de impulsores y medios de transmisión de fuerza. Una bomba centrífuga, su impulsor y su método de operación deben formar una unidad integral y armoniosa. La aplicación específica, para la cual se destina la bomba, dictará no sólo la selección de la bomba en sí, sino que también la de su impulsor.

III.1.9. Espacio, peso y limitaciones de transporte.

Algunas veces las bombas tienen que instalarse en lugares muy estrechos. En esos casos pueden preferirse las bombas centrífugas, porque sólo necesitan una pequeña fricción del área del piso que requiere una bomba horizontal de la misma capacidad. Una bomba que opera a la velocidad máxima compatible con las condiciones de servicio reducirá también los requerimientos de espacio. Aunque el uso de las bombas directamente conectadas se introdujo, inicialmente, por consideraciones de economía en el costo inicial, la aplicación de esas bombas presenta ventajas definidas de economía de espacio. Finalmente, en gran número de casos, el uso de bombas horizontales con succión por el fondo puede simplificar considerablemente el problema de acomodo en el área y de la tubería de succión.

III.1.10. Localización de la instalación.

La localización geográfica de la instalación tiene una gran influencia en la selección apropiada de la bomba y en su mantenimiento.

Los alrededores próximos a una bomba afectarán su accesibilidad después de instalada. Una bomba localizada en una posición estrecha, sucia y húmeda o mal alumbrada será descuidada por los operadores, no dará servicio satisfactorio y será difícil para inspeccionar, desarmar y repararla.

Se debe tener en consideración la localización geográfica cuando se recomiendan partes de repuesto, porque una bomba que se va a operar en lugares apartados, deberá sustituirse con suficientes partes de repuesto para evitar la interrupción del servicio si se desgastan las partes y no se pueden sustituir rápidamente.

III.1.11. Requerimientos especiales.

El fabricante de la bomba debe familiarizarse con cualquier requerimiento especial y las preferencias del personal que va a operar el equipo de bombeo centrífugo. Algunas de estas preferencias pueden estar basadas en un conocimiento insuficiente de los procedimientos modernos; o pueden tener su origen en experiencias con bombas que operan en las mismas condiciones, en las que habrá que operar las bombas nuevas. Esta información puede ser valiosa para ayudar al fabricante de la bomba a surtir un equipo que dará el servicio más duradero y confiable.

Sin embargo, las recomendaciones del cliente deberán limitarse a la experiencia con bombas que operan en las mismas condiciones, en vez de una lista de sus preferencias, que pueden conducir a la adquisición de equipo muy especial. Es preferible la construcción normal del fabricante a unidades construidas especialmente, tanto desde el punto de vista del costo original como para obtener las partes de repuesto más tarde.

También es necesario tomar en consideración la vida probable de la instalación. Si el diseño y los materiales de construcción se seleccionan para una duración mucho mayor que la vida probable del proceso o instalación, para la que se destina el equipo, el costo inicial de este estará fuera de proporción. En otras palabras, es una política inadecuada comprar equipo con una vida de doce meses para una instalación que va a durar quince años; es igualmente absurdo comprar una bomba con vida de veinte años si sólo se espera usarla un período de seis meses.

III.2. Solicitudes para servicios especiales.

El conocimiento de los factores, descritos arriba, es un requisito previo para un análisis inteligente del problema que se presenta y su solución. Sin embargo, los factores no

son igualmente importantes para todos los diferentes servicios en los que se pueden clasificar las aplicaciones de bombas centrífugas. Adelante se describen algunos servicios representativos que son los que se encuentran más comúnmente y los puntos más importantes que se deben examinar en cada uno de ellos.

Como la mayoría de las bombas son movidas por motores de velocidad constante, estas listas se han preparado para este tipo de impulsor, con una excepción. Si se usa un impulsor de velocidad variable, la velocidad de operación puede ajustarse para que la unidad pueda cubrir una variación más amplia de condiciones de lo que es posible con el impulsor de velocidad constante. Exceptuando una partida única, es decir, las unidades de bombeo turbocentrífugas, esta lista no describe información necesaria para hacer la selección del impulsor. Si se van a comprar los impulsores con las bombas, se debe incluir en la solicitud, información completa sobre el tipo que deberá suministrarse.

III.2.1. Servicios de abastecimiento de agua. Servicio de alimentación a calderas.

1. Capacidad requerida en litros por minuto o en kilogramos por hora, incluyendo máxima, mínima y normal. Si se expresa en litros por minuto, la conversión de kilogramos por hora deberá incluir las correcciones por peso específico. La capacidad total de las bombas instaladas, excluyendo el equipo de repuesto deberá exceder a la capacidad máxima de evaporación de las calderas en un 8 a 20%. Este margen está destinado a proporcionar seguridad contra las oscilaciones de la caldera así como contra la reducción eventual de la capacidad de la bomba por desgaste antes de reponerle las partes gastadas.
2. Temperaturas del agua de alimentación y posibles variaciones.
3. Condiciones de succión. Variaciones de la presión de succión e información de la NPSH mínima disponible. Si la bomba toma succión de un calentador de agua de alimentación de contacto directo, la NPSH (energía disponible arriba y sobre la presión de vapor) es la sumersión estática entre el nivel del agua en el espacio de almacenamiento y la línea de centro de la bomba, menos las pérdidas por

fricción en la tubería de succión. Sin embargo, si la bomba toma succión de la descarga de alguna otra bomba, como la de condensado o de elevación de presión contra calentadores cerrados localizados entre ellos, la NPSH disponible será la diferencia entre la presión de succión y la presión de vapor a la temperatura de bombeo, convertida a metros de agua a esta temperatura.

4. Presión de descarga. Si no se tiene, la presión de la caldera, ya que ésta permitirá estimar la presión de descarga requerida. La experiencia demuestra que la presión de descarga requerida variará de un 115 a un 125% de la presión de la caldera. Para una determinación más precisa, es necesario conocer la presión máxima del tambor, la elevación estática del tambor de la caldera sobre el piso de la bomba, las pérdidas por fricción en la tubería de descarga y en los calentadores cerrados en la descarga de la bomba, y las pérdidas en el regulador de agua de alimentación.
5. Análisis químico del agua de alimentación. Descripción del valor de pH si no está completo el análisis. Información, si se tiene, de la experiencia anterior con materiales para bombas de alimentación a calderas que manejen la misma agua.
6. Un esquema completo del sistema de agua de alimentación y un diagrama del balance térmico, deberán suministrarse al fabricante de bombas, siempre que sea posible.

III.3. Características de la bomba seleccionada.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas para seleccionar un equipo de bombeo adecuado, se obtienen de Catálogo los siguientes datos:

Tipo de Bomba: AP- 45/6

No. de Etapas: 14

n: 1750 r/min

Tabla III.1. Datos dados por el fabricante.

Flujo(m^3/h)	Carga (m)
18	238
24	223
30	202
36	172

Los parámetros nominales de la bomba se muestran en la **Tabla III.2.** a continuación.

Tabla III.2. Parámetros nominales de la bomba obtenidos a partir de los datos del fabricante.

Parámetros nominales.	
Flujo (m^3/h).	30
Carga (m)	202
Potencia eje (kW)	30
Eficiencia (%)	65

Con los datos del fabricante se construyeron las curvas de la bomba y con los puntos nominales se construyeron las mismas curvas pero utilizando el montaje en Microsoft Excel explicado en el Epígrafe II.2. Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura III.1.** La eficiencia fue obtenida mediante el resultado anteriormente expuesto.

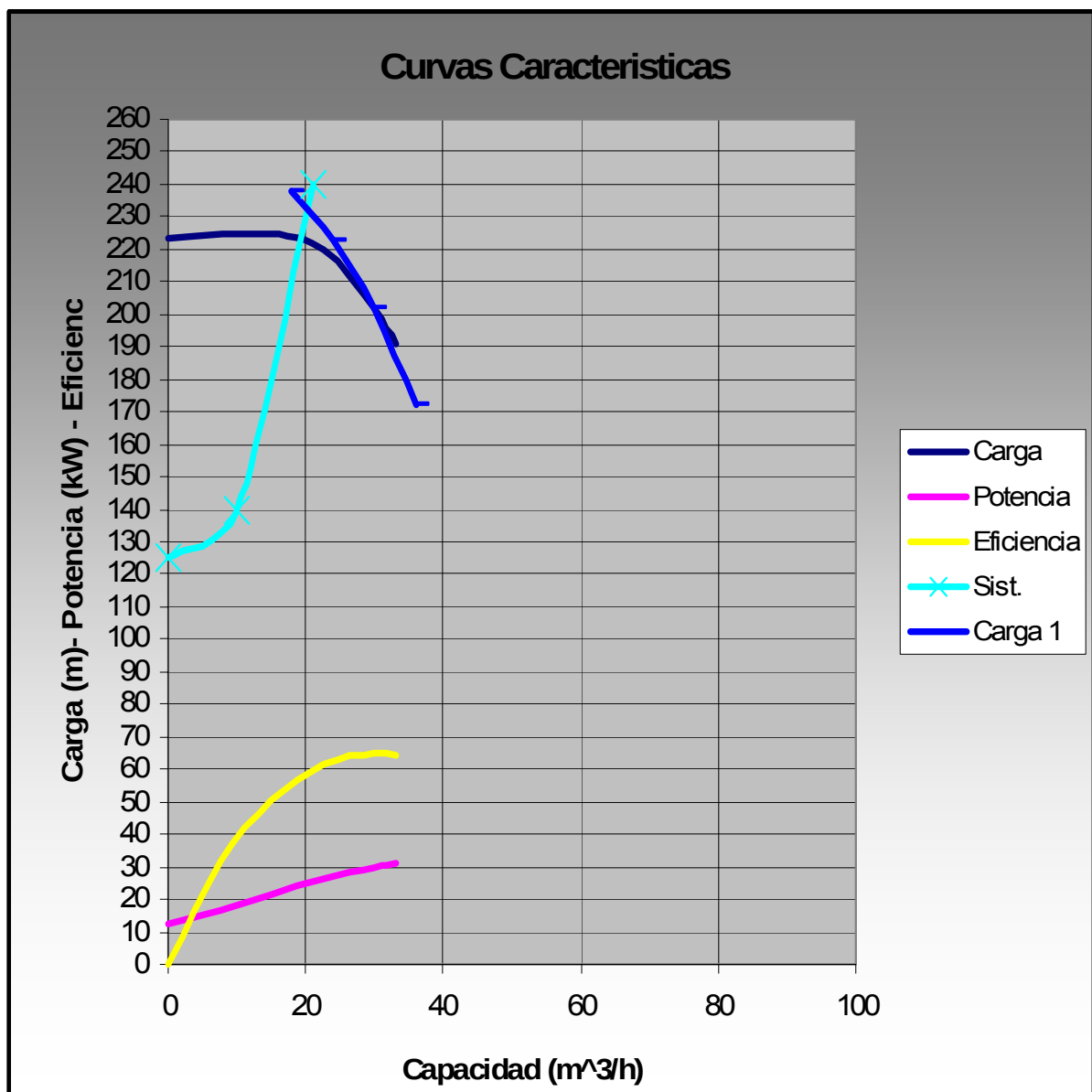


Figura III.1. Resultado de la curva por los datos de la chapa.

La curva -carga 1- está construida con los valores dados por el fabricante, las demás se obtuvieron a partir de los datos de chapa.

III.4. Análisis del comportamiento de la bomba seleccionada.

1. Índice de consumo de la estación (I.C).

$$IC = \frac{\frac{kW}{m^3}}{h} = \frac{25}{23.13} = 1.08 \frac{kWh}{m^3}$$

2. Eficiencia de la Instalación.

$$\eta_{instalación.} = \eta_{motor} * \eta_{bomba}$$

$$\eta_{instalación.} = \eta_{motor} * \eta_{bomba}$$

$$\eta_{instalación.} = 0,83 * 0,65 = 0,53$$

3. Energía gastada por la bomba.

$$\text{Energía Gastada} = N_{\text{Pot. eje.}} * h/\text{día de trabajo.}$$

$$\text{Energía Gastada} = 25 \text{ kW} * 24 \text{ horas} = 600 \text{ kWh/día}$$

4. Energía perdida.

$$\text{Energía perdida} = \eta_{bomba} * \text{Energía Gastada}$$

$$= 0,65 * 600 \text{ kWh/ día}$$

$$= 390 \text{ kWh/día}$$

5. Potencia eléctrica.

$$N_{\text{elect}} = N_{\text{eje.}} / \eta_{\text{motor}}$$

$$= 25 \text{ kW} / 0,83 = 30,12 \text{ kW}$$

6. Consumo de kWh en un mes trabajando 24 horas al día.

$$\begin{aligned}\text{Consumo} &= N_{\text{elect.}} * 24 \text{ h/día} * 30 \text{ días / mes} \\ &= 30,12 * 24 * 30 \\ &= 21\,686 \text{ kWh/ mes}\end{aligned}$$

III.5. Determinación del costo del ciclo de vida.

Este cálculo se basa en que si las ganancias por la venta del servicio se pueden considerar iguales, entonces los gastos determinarán las diferencias de los flujos anuales de efectivo entre diferentes alternativas, y por consiguiente, la diferencia en los valores presente netos (VPN). Si entonces no consideramos los ingresos en los flujos de caja, o restamos una cantidad igual para hacerlos cero por igual para todas las alternativas, la diferencia entre los VPN se verá equitativamente afectada, y nos servirá para comparar las alternativas en base a costos. Esta variante de cálculo del VPN cuando no se consideran los ingresos o estos son cero es el llamado Costo del ciclo de vida, o valor presente neto de los costos (VPNC).

$$CCV = -k_0 - \sum \frac{G_e}{(1+D)^i}$$

CCV : Costo del ciclo de vida (cuc)

K_0 : Costo inicial. (cuc)

G_e : Costo energético (cuc)

D : Tasa de descuento real utilizada = 16 %

I : Vida útil estimada (10 años)

Bomba actual

Para calcular el gasto energético (G_e)

Se calculó la potencia de la bomba (N_b) y a partir de esta se determinó el gasto de la misma en un año.

$$N_b = \frac{\delta * g * Q * H_b}{10^3 * \eta_b}$$

Donde:

δ = Densidad de líquido a bombear (kg/m^3)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Q = Caudal de suministro a la bomba (m^3/s)

H = Carga de la bomba (m)

η = Rendimiento de la bomba (%)

$N_b = 52,36 \text{ kW}$

$$G_e = \frac{\text{cuc}}{\text{kWh}} * \text{kW} * \frac{h}{d} * \frac{d}{a} = \frac{\text{cuc}}{a}$$

Donde:

cuc: Moneda libremente convertible

kW: Potencia consumida

h: Horas trabajadas

d: Días trabajados

a: Años trabajados

$$G_e = 0,14 * 52,36 * 24 * 365 = 64214,3 \frac{\text{cuc}}{a}$$

$$\text{CCV} = -k_0 - \sum \frac{G_e}{(1+D)^i}$$

$$\text{CCV} = -33\,000 - \sum \frac{64214,3}{4,41}$$

$$\text{CCV} = 47561 \text{ cuc}$$

Bomba nueva

$$G_e = \frac{\text{cuc}}{\text{kWh}} * \text{kW} * \frac{h}{d} * \frac{d}{a} = \frac{\text{cuc}}{a}$$

$$G_e = 0,14 * 18,67 * 24 * 365 = 22896,8 \frac{cuc}{a}$$

$$CCV = -k_0 - \sum \frac{G_e}{(1+D)^i}$$

$$CCV = -33\,000 - \sum \frac{22896,8}{4,41}$$

$$CCV = 38192 \text{ cuc}$$

III.6. Comparación de los resultados obtenidos de ambas bombas.

Tabla III.3. Comparación entre las bombas analizadas.

Parámetros	Bomba en uso	Bomba nueva
Índice de consumo (kWh/m ³).	2,25	1,08
Eficiencia de la instalación.	0,26	0,53
Consumo (kWh) mensuales.	37 490,44	21 686
Energía perdida (kWh/día)	237,12	390
Costo del ciclo de vida (cuc)	47 561	38 192

Para realizar el cálculo se determinó el gasto de energía, se investigó por el costo de inversión de las bombas en Cuba, los demás gastos son iguales para las 2 bombas (mantenimiento, personal, operación, montaje e instalación) y a partir de estos datos se cálculo el costo del ciclo de vida de las bombas, se hizo este cálculo ya que en la industria las bombas están dentro del proceso industrial, por lo que estas no reportan

ingresos ni producen ganancia, y entonces el análisis económico debe realizarse sobre el análisis del costo del ciclo de vida de las bombas evaluadas donde no es posible calcular otros indicadores económicos como son ingresos, ganancias.

Conclusiones Parciales.

Luego del análisis desarrollado en nuestro trabajo podemos concluir que:

- 1- La bomba que se encuentra en operación presenta una eficiencia inferior a la que se propone $0,28 < 0,65$.
- 2- La bomba seleccionada consumirá aproximadamente la mitad de la energía que consume la que está en funcionamiento con un ahorro de 15 804 kWh mensuales.
- 3- El índice de consumo disminuirá en 1,17 si se instala la nueva bomba.
- 4- La evaluación dio como resultado que es necesaria la adquisición de una nueva Motobomba para el sector energético de la Refinería de Petróleo "Camilo Cienfuegos".

Conclusiones

Conclusiones.

1. Con la evaluación del sistema de bombeo de agua de alimentar los generadores de vapor de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”, se llega a la conclusión de que las bombas están sobredimensionadas, debido a que en la adquisición se realizó una mala selección de las mismas, dando como resultado ineficiencias del motor y de la bomba.
2. Con la bomba actual se requieren utilizar los sistemas de regulación de flujo, como estrangulación, by pass o recirculación, para mejorar la eficiencia de la bomba, provocando un elevado consumo de energía eléctrica.
3. La caracterización hidráulica y energética del sistema de bombeo evaluado permitió determinar los parámetros de trabajo del mismo, con lo cual se pudo comprobar que la explotación de este no es la más adecuada por no ser eficiente ni factible económicamente.
4. Se aplicó una metodología para determinar las curvas características de la bomba actual y la propuesta, lo cual permitió determinar el rendimiento del sistema de bombeo para diferentes capacidades de flujo.
5. El cálculo del Costo del Ciclo de Vida de la bomba propuesta para 10 años de trabajo es 38192 cuc el cual resulta inferior al de la bomba actual y por consiguiente es más factible economicamente.

Recomendaciones

Recomendaciones.

Como resultado del estudio efectuado, se recomienda:

1. Realizar un estudio eléctrico con amplio nivel de detalle, para la posible selección de un Variador de Velocidad.
2. Efectuar estudios cibernéticos para definir la posibilidad de sustitución de las válvulas neumáticas o de estrangulación de flujo por transmisores inteligentes que se conecten en el domo de la caldera, controlando el nivel de agua y enviando la señal al Variador de Velocidad que debe estar situado en el motor de la bomba de agua de alimentación.
3. Proponer a la dirección administrativa de la Refinería la sustitución de la motobomba en servicio por la propuesta en este trabajo, para mejorar la explotación del sistema de bombeo, lograr mayor eficiencia energética y ahorros económicos.

Bibliografía

Bibliografía:

- Colectivo de Autores. (2009). Clasificación de las bombas. Retrieved from <http://html.rincondelvago.com/bombas.html>.
- Colectivo de Autores. (2000). Desarrollo Histórico de la Ingeniería en la Provincia de Cienfuegos. Editorial Universidad de Cienfuegos.
- Colectivo de Autores. (2010). Evaluación de motobombas centrífugas en servicio. Presented at the 6° Evento internacional de energía y medio ambiente, Cienfuegos.
- Colectivo de Autores. (1981). *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. Estados Unidos: Crame. McGraw – Hill.
- Consuegra Urquiza, Marcos M., (2008). *Gestión Energética en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de la Provincia de Cienfuegos*. Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos.
- Cuba. Ministerio de Educación. (2006). *Gestión y Economía Energética*. Cienfuegos: Editorial Universidad de Cienfuegos.
- Cherkaski, V.M. (1986). Bombas, ventiladores. In *Bombas Centrífugas: selección, operación y mantenimiento* (pp. 217-245). Moscú: Editorial MIR.
- Church, A.H. (1985). Instalación, funcionamiento y ensayos de las bombas. In *Bombas y Máquinas Soplantes Centrífugas: su teoría, cálculo, construcción y funcionamiento* (pp. 175-188.). La Habana: Edición Revolucionaria.
- Karassik, Igor J. (1995). *Bombas centrífugas*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- Preobrazhenski, V.P. (1980). Datos generales sobre las mediciones. In *Mediciones Termotécnicas y Aparatos para efectuarlas* (Vol. 1, pp. 37-40). Moscú: Editorial MIR.
- Ramos Páez, Néstor. (1995). *Bombas, ventiladores y compresores*. La Habana: Editora ISPJAE.
- Roque Díaz, Dr Pablo. (2010, May). Consumo de Energía Eléctrica en el Sector Residencial.
- Santos García, Felix. (1999). *Normalización de Bombas*. Tesis Doctoral, UCLV, Santa Clara.