

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REDISEÑO DEL CIRCUITO CERRADO DE ENFRIAMIENTO DE MÁQUINAS
EN UNA FÁBRICA DE BEBIDAS, MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UNA
BOMBA DE VELOCIDAD VARIABLE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

POR

**BERNARDO VEGA MARTÍNEZ
ASESORADO POR EL ING. CÉSAR MARTÍNEZ**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Pacheco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Pablo Fernando Hernández
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Pacheco

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios a mi familia que siempre estuvieron a mi lado en todo momento, esperando haberle dado a mis padres la satisfacción de haber culminado con éxito mi carrera universitaria.

También agradezco a:

Mi abuelo Augusto por ese inigualable cariño y apoyo que siempre me brindo.

Mis tíos Silvia y Antonio García por permitirme vivir en su hogar dándome el cariño de una familia.

A mi hermana Susana, todos primos y tíos.

A mi novia María Isabel y su familia por su compañía incondicional en los momentos buenos y malos.

A mi tío Cesar por sus sabios consejos y su ayuda como asesor de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IV
LISTA DE ABREVIATURAS	V
GLOSARIO	VI
OBJETIVOS	VIII
INTRODUCCIÓN	IX

GENERALIDADES

1.1. Descripción de la sala de máquinas	1
1.2. Bombas de agua	2
1.2.1. Qué es una bomba	2
1.2.2. Para qué sirve una bomba	3

SISTEMA ACTUAL

2.1. Circuito cerrado de enfriamiento de equipos	4
2.1.1. Descripción del funcionamiento del circuito cerrado	4
2.1.2. Diagrama del circuito cerrado	6
2.2. Descripción de los problemas presentados del circuito cerrado	7
2.2.1. Aumentos de presión	7
2.2.2. Consumos elevados de energía	7
2.2.3. Paros no programados de maquinaria por bajo flujo	8
2.3. Bombas centrífugas	8
2.3.1. Descripción de las bombas centrífugas de circulación radial	8

2.3.2. Tipos de impulsores y sus características	11
2.3.2.1. Impulsores abiertos	11
2.3.2.2. Impulsores semiabiertos	12
2.3.2.3. Impulsores cerrados	12
2.3.3. Leyes de afinidad	14
2.3.4. Curvas características de funcionamiento	15
2.3.5. Comparación entre una bomba centrífuga con velocidad constante y una bomba centrífuga operando con velocidad variable	16
2.4. Variadores de velocidad	17
2.4.1. Reductores de velocidad	17
2.4.2. Variadores de velocidad electrónicos	18

SISTEMA PROPUESTO

3.1. Descripción del funcionamiento del sistema propuesto	20
3.2. Selección de la bomba	21
3.2.1. Determinación del rango de funcionamiento de la bomba	21
3.2.2. Rango de flujo	22
3.2.3. Rango de velocidades	24
3.2.4. Presión a la cual funcionará	25
3.2.5. Determinación del tipo de bomba a utilizar	25
3.2.6. Selección final del modelo y características de la bomba	26
3.3. Análisis económico	29
3.3.1. Cálculo de los ahorros por consumo de energía eléctrica	29
3.3.2. Cálculo de los ahorros por mantenimiento de equipos	30
3.3.3. Detalle de los costos para la implementación del sistema	30
3.3.4. Cálculo del retorno de la inversión	31

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

4.1. Anclaje de la bomba	32
4.2. Válvulas de succión y descarga	32
4.3. Transmisor de presión	33
4.4. Controlador	33
4.5. Variador de velocidad	34
4.6. Diagrama de instalación	34

SEGUIMIENTO

5.1. Lista de chequeo de la bomba	36
5.2. Mantenimiento de la bomba	37
5.2.1. Cambio de sellos	37
5.2.2. Revisión de nivel de aceite	37

CONCLUSIONES

39

RECOMENDACIONES	41
-----------------	----

BIBLIOGRAFÍA	42
--------------	----

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama circuito cerrado	5
2.	Corte transversal bomba centrífuga	8
3.	Impulsor abierto	11
4.	Impulsor semiabierto	11
5.	Impulsor cerrado	11
6.	Curva característica ideal	13
7.	Curva característica real	14
8.	Diagrama de funcionamiento variador	16
9.	Curva característica bomba actual	21
10.	Dimensiones de la bomba (mm)	24
11.	Curva característica bomba seleccionada	25
12.	Distribución porcentual del tiempo	26
13.	Diagrama de instalación	32
14.	Lista de chequeo	34
15.	Nivel de aceite de la bomba	36

TABLAS

I.	Consumos de enfriamiento	20
II.	Consumos de energía	27
III.	Costos de mantenimiento	28

Lista de Abreviaturas

HP	Dimensional de potencia, significa caballos de fuerza.
GPM	Dimensional de flujo, significa galones por minuto.
Psi	Dimensional de presión, significa libras de fuerza por cada pulgada cuadrada de área.
mA	Dimensional de corriente, significa mili amperios.

GLOSARIO

Cabeza	Es la altura equivalente a la presión de descarga de la bomba tomando en cuenta la presión necesaria para que el fluido llegue a dicha altura.
Calor	Es una forma de energía que fluye de un cuerpo a otro debido a la diferencia de temperatura existente entre ambos.
Compresor	Máquina que aumenta la presión de un gas por medio de la disminución sustancial de su volumen original.
Controlador	Dispositivo electrónico más conocido como PLC (control lógico programable) utilizado ampliamente en procesos automatizados para llevar la secuencia de las operaciones o pasos que se requieren en determinado proceso.
Descarga	Refiérase a la liberación del fluido luego de haber pasado por el cuerpo de la bomba, en la cual dicho fluido posee la presión necesaria para el trabajo que deberá desempeñar.
Impulsor	Parte principal de una bomba centrífuga que es encargada de transmitir al fluido un movimiento centrífugo alrededor de la carcasa de la bomba con el fin de proporcionarle velocidad y fuerza.

Interenfriador Intercambiador de calor utilizado en procesos internos de equipos con el fin de disipar el calor generado en dichos procesos.

Interruptor Dispositivo que corta la alimentación de energía eléctrica a un sistema o equipo.

Parámetro Variable a ser controlada.

Succión Es el trabajo de aspiración que hace una bomba para que el fluido llegue al cuerpo de la bomba.

Torre de enfriamiento Equipo utilizado para remover el calor que el agua ha adquirido durante cierto proceso, cediendo dicho calor a un flujo de aire que se hace pasar en contracorriente al agua o medio de enfriamiento.

Transmisor de presión Instrumento electrónico que mide presión y lo traduce a una señal eléctrica utilizada, ya sea para ser desplegada o para fines de una secuencia lógica necesaria para el proceso.

OBJETIVOS

General

Implementar un sistema de bombeo para un circuito cerrado de agua de enfriamiento mediante velocidad variable, para hacer más eficiente el sistema existente en una fabrica de bebidas.

Específicos

1. Identificar las características necesarias para poder variar la velocidad de la bomba centrífuga.
2. Identificar las limitaciones de velocidad en la bomba centrífuga para operación con velocidad variable.
3. Determinar el rango de velocidades, presiones y flujo en los que la bomba seleccionada funcionará.
4. Seleccionar la bomba adecuada para el sistema de bombeo en estudio.
5. Determinar la instrumentación necesaria para el funcionamiento del sistema.
6. Determinar el ahorro que se obtendrá en el sistema propuesto.
7. De acuerdo con el ahorro obtenido, determinar el retorno de la inversión necesaria para la implementación del sistema propuesto.

INTRODUCCIÓN

El enfriamiento de equipos es una parte de la operación de maquinaria muy importante, debido a que a falta de enfriamiento pueden sufrir graves daños provocados por altas temperaturas.

A medida que la empresa fue aumentando su capacidad, fue aumentando la demanda de los servicios para las líneas de producción y plantas de elaboración de productos, servicios como el aire comprimido, agua, gas carbónico y refrigeración son elementales para el funcionamiento de una fábrica de bebidas. Por lo tanto, en una sala de maquinaria con bastantes equipos es importante contar con un adecuado sistema de bombeo de agua de enfriamiento, de lo contrario, al ser el sistema ineficiente, el consumo de energía eléctrica puede llegar a ser bastante elevado, además se corre el riesgo de provocar daños en maquinaria y paros no programados que a su vez provocarán ineficiencia en la producción y, de ser muy prolongados, pueden ocasionar pérdidas significativas a la empresa.

Las demandas de agua de enfriamiento fluctúan dependiendo de la cantidad de maquinaria que opera durante el día. En horas de producción alta la demanda es elevada, mientras que por las noches, cuando la producción es baja, la demanda puede disminuir demasiado de manera que el bombeo de bastante agua resulta ineficiente.

Una solución para este tipo de problemas podría ser la utilización de una bomba con velocidad variable, con la que se lograría que el sistema se adapte a la demanda, de manera que si el consumo

de agua de enfriamiento disminuye, la capacidad de bombeo también disminuya por medio de la variación de la velocidad, logrando con esto una adecuada utilización de la energía eléctrica.

La velocidad variable en bombas centrífugas es una solución factible, pero al seleccionar una bomba para operación con velocidad variable hay que tener en cuenta ciertas características para que el sistema pueda operar eficientemente. En esta investigación se concluirá acerca de esas características que hay que tomar en cuenta para que la selección de una bomba de velocidad variable sea la solución adecuada a este tipo de sistemas; además, se proporcionará una guía a seguir para la implementación y operación del sistema propuesto con el fin de que el funcionamiento sea óptimo.

La implementación de esta solución traerá como beneficio para la empresa en estudio, y para las empresas del ramo en las cuales estén interesados en implementar este tipo de sistemas, un ahorro de energía eléctrica bastante considerable, debido a que con un sistema de bombeo de este tipo el consumo de energía es únicamente el necesario. En horas de baja producción el flujo de las bombas será bajo y también el consumo de energía, y en horas de producción alta, el flujo de las bombas se adaptará a la necesidad y el consumo de energía eléctrica será relativo al trabajo que realice la bomba.

Otro de los beneficios es que no se corre el riesgo de provocar daños en los equipos por la variación de la presión, ya que la presión se mantiene constante, y es por medio del monitoreo de ésta que se hace variar la velocidad de la bomba.

1. GENERALIDADES

5.3. Descripción de la sala de máquinas

La sala de máquinas es el área en el cual se llevan a cabo todos aquellos procesos necesarios para el adecuado desempeño de otros equipos o que forman parte de algún proceso de fabricación en la empresa, a estos procesos se les suele llamar servicios. Entre los servicios que se encuentran en la Sala de máquinas están el aire comprimido, refrigeración, recuperación y distribución de CO₂ y bombeo de agua cruda.

Es importante mencionar que el funcionamiento de otras áreas depende en gran parte de la disponibilidad y eficiencia de los servicios de la sala de máquinas. En los salones de embotellado, la gran mayoría de los equipos utiliza aire comprimido para su funcionamiento. Movimiento de cilindros neumáticos y accionamiento de válvulas son algunas de las principales funciones del aire comprimido en un salón de embotellado.

Por aparte algunos de los productos que se manufacturan en la empresa requieren de la conservación a baja temperatura en alguna parte del proceso de fabricación, que de lo contrario, de no haber un buen funcionamiento del sistema de refrigeración, el producto se perdería. Es así como se logra notar la gran importancia que tiene la adecuada operación de los equipos de la sala de máquinas, con uno de todos los servicios que no se encuentre disponible, alguno de los procesos en la fábrica se ve afectado acarreado como consecuencia costos elevados por paros de línea, mermas, etc.

Los equipos de la sala de máquinas se encuentran casi en su totalidad automatizados, el operador puede visualizar las condiciones de operación de la maquinaria desde un monitor donde se despliegan los parámetros principales del funcionamiento de los equipos, además, el sistema de automatización lleva un récord de estos parámetros, los cuales pueden ser consultados en cualquier momento que un usuario lo requiera.

5.4. Bombas de agua

5.4.1. Qué es una bomba

Una bomba es un transformador de energía. Recibe energía mecánica que puede proceder de un motor eléctrico, térmico, etc., y la convierte en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de posición o velocidad.

Una bomba es un dispositivo utilizado para mover líquidos de un punto a otro por medio del aumento de la presión del fluido, utilizando para esto energía eléctrica o mecánica.

Existen distintos tipos de bombas, pero una división general lo son las bombas de desplazamiento positivo y bombas centrífugas, las cuales su diferencia se encuentra en el principio de operación, por ejemplo la operación de una bomba de desplazamiento positivo se basa en bombear volúmenes en forma fraccionada, y por el contrario, una bomba centrífuga bombea volúmenes de manera continua.

Una bomba de desplazamiento positivo puede utilizar un émbolo, lóbulos o engranajes como parte principal para elevar la presión de el líquido, y por aparte una bomba centrífuga utiliza un impulsor, el cual varía su diseño dependiendo de la aplicación.

5.4.2. Para qué sirve una bomba

Las bombas son de gran utilidad en las industrias, en áreas residenciales, en sistemas de riego, etc. Por ejemplo, en la industria tienen un sin fin de aplicaciones, como trasiego de agua, alimentación de agua para una caldera, dosificación de químicos en una caldera, circulación de aceite para lubricación en una máquina, bombeo de productos líquidos como cerveza, gaseosas, jabón líquido, etc. Es importante mencionar que el tipo de bomba a utilizar depende de la aplicación para la cual se requiera, cada bomba tiene distinta finalidad.

2.SITUACIÓN ACTUAL

6.1. Circuito cerrado de enfriamiento de equipos

6.1.1. Descripción del funcionamiento del circuito cerrado

Las partes principales del circuito cerrado son: bombas, torres de enfriamiento, transmisor de presión, transmisores de temperatura, válvulas de paso eléctricas y los equipos a los cuales se enfría.

El circuito cerrado de enfriamiento, como su nombre lo dice, consiste en un sistema de recirculación de agua para el enfriamiento de los equipos de la sala de máquinas. Algunos de esos equipos son los compresores de aire comprimido, compresores de amoníaco y compresores de CO₂.

Los compresores disipan una gran cantidad de calor, ya que el gas que comprimen eleva su temperatura debido a que sus moléculas son obligadas a ocupar un espacio menor y por esta razón existe fricción entre las mismas, generando altas temperaturas, por lo que es necesario enfriar los compresores en sus interenfriadores. Éstos están diseñados para hacer circular adentro de ellos agua para que esta absorba el calor generado en el compresor.

El sentido del flujo del agua de enfriamiento se lleva a cabo de la siguiente manera: el agua es succionada por las bombas desde un depósito de almacenamiento, y se hace circular por una tubería que forma un anillo en toda la sala de máquinas, en el cual el agua de enfriamiento es distribuida en cada compresor durante el recorrido de la tubería del circuito cerrado, luego, al salir el agua de cada interenfriador, es recolectada en un anillo de tubería de

retorno exactamente igual al de alimentación y luego el agua es conducida a las torres de enfriamiento en donde el agua cede todo el calor que absorbió en los intercambiadores de calor de cada compresor, y seguidamente el agua ingresa al tanque de almacenamiento de agua de enfriamiento.

La cantidad de bombas que operan depende de la cantidad de compresores que funcionan, es decir que mientras más demanda de aire, amoniaco y CO₂ existe, se necesita más flujo de enfriamiento y por lo tanto más bombas para la recirculación del agua.

La manera en la cual se determina si hay más o menos demanda de agua es midiendo la presión del sistema. Hay que tomar en cuenta que si la presión del sistema disminuye es porque más compresores empezaron a operar y por lo tanto hay más demanda de agua de enfriamiento y, al contrario, si la presión aumenta, quiere decir que la demanda de agua de enfriamiento ha disminuido y menos bombas deben de operar.

La presión se mide por medio de un transmisor de presión electrónico PT (ver figura 1), el transmisor de presión está instalado en la tubería de descarga de las bombas el cual envía la señal a un PLC (Control Lógico Programable), el cual está programado para enviar dos señales: arranque de bombas según una secuencia establecida en caso que la presión del sistema disminuya; y paro de bombas según como la presión valla aumentando. El PLC compara la presión con un dato de presión fija, la cual debe mantenerse durante todo el tiempo, si existe una variación en la medición de la presión del sistema, en ese momento el PLC envía la señal de arranque o paro de las bombas.

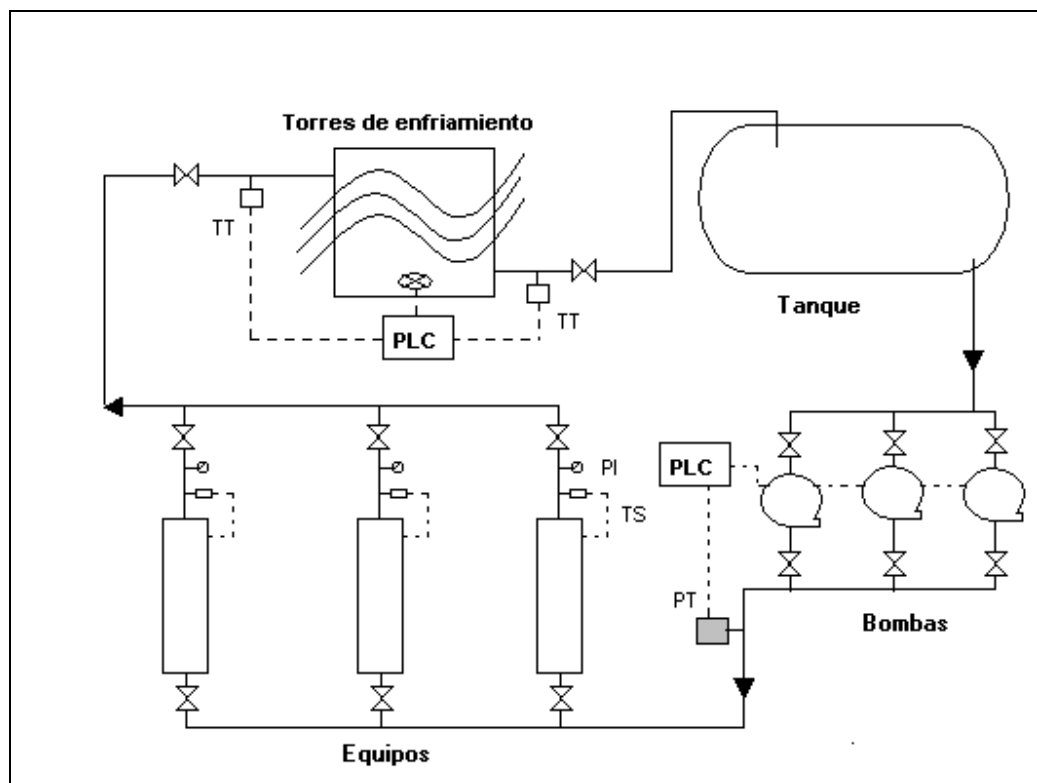
Por aparte, como se logra observar en la figura 1, en la tubería de salida de agua de enfriamiento de cada equipo está instalado un manómetro PI, y un

interruptor de temperatura TS, del cual se explica su funcionamiento más adelante.

En las torres de enfriamiento están instalados transmisores de temperatura TT, que miden la temperatura del agua a la entrada y a la salida de la torre de enfriamiento y envían una señal a un PLC, su función es de mantener una temperatura constante de 22⁰ C en el agua de enfriamiento, y esto lo logra activando más o menos ventiladores de la torre.

6.1.2. Diagrama del circuito cerrado

Figura 1. Diagrama del circuito cerrado



6.2. Descripción de los problemas presentados

6.2.1. Aumentos de presión

Como anteriormente se menciona, el arranque y la secuencia misma de la operación de las bombas depende de una variable que se mide en el sistema, la cual es la presión. Si la presión disminuye se necesita que otra u otras bombas operen, es decir que la disminución de la presión implica que hay más demanda de agua de enfriamiento, al contrario, cuando hay aumento de la presión del sistema significa que la demanda de agua de enfriamiento ha disminuido.

La señal de presión ingresa a un bloque de control tipo PID (proporcional, integral, derivado) el cual, dependiendo de la desviación que exista de la presión real a la presión de consigna, da una señal de salida la cual envía la señal de arranque o paro. El sistema actual no está diseñado para mantener una presión constante, por lo que al haber bastante demanda el sistema manda una señal para el arranque de dos y a veces tres bombas simultáneas, logrando obtener el flujo necesario pero a una presión no adecuada que es mayor necesaria para vencer las pérdidas por fricción de las tuberías.

6.2.2. Consumos elevados de energía

Actualmente el sistema del circuito cerrado de enfriamiento cuenta con 3 bombas, una de 25 HP que es la más eficiente (80 %) y otras dos de 15 HP pero baja eficiencia (60 %); esto provoca un alto consumo de energía. La baja eficiencia se debe al desgaste de las partes de las bombas (carcasa e impulsores) debido a que son bastante antiguas, además poseen diseños

obsoletos. El consumo actual de energía eléctrica se puede observar en el cuadro de análisis económico que se muestra más adelante.

6.2.3. Paros no programados de maquinaria por bajo flujo

Los equipos de la sala de máquinas que utilizan agua de enfriamiento tienen instalado en la tubería de salida del medio enfriado (aire, gas carbónico o aceite del compresor de amoníaco) del mismo equipo un interruptor de temperatura; el cual se activa en caso de que la temperatura del fluido enfriado empieza a incrementar por encima de un rango normal, lo cual significa que hay bajo flujo o alta temperatura del agua de enfriamiento. Al activarse el interruptor de temperatura, el motor del compresor en que se encuentre operando automáticamente se detiene. En varias ocasiones ha sucedido que por bajo flujo de enfriamiento los compresores han parado, trayendo como consecuencia problemas muy delicados en la producción como el paro no programado de maquinaria que afecta indirectamente otras áreas de producción.

6.3. Bombas centrífugas

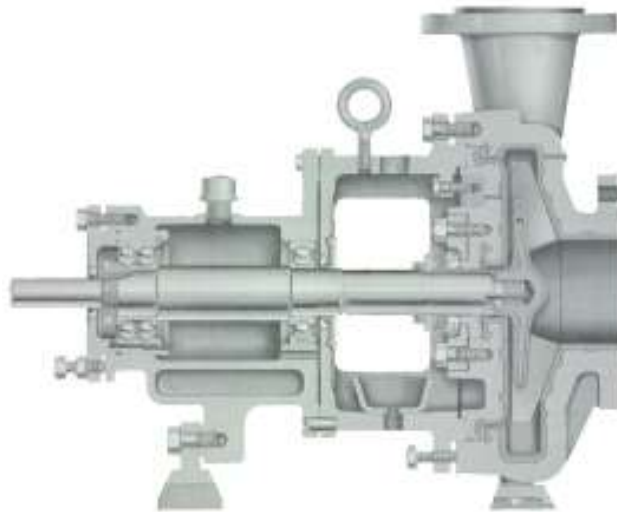
6.3.1. Descripción

Las bombas centrífugas han venido a sustituir a las bombas reciprocantes debido a una gran cantidad de ventajas que presentan en su diseño y funcionamiento. Tienen a su favor condiciones de descarga constantes a una presión dada, que no tienen las reciprocantes; y además no presentan problemas de válvulas que son tan comunes en las reciprocantes.

La bomba centrífuga sirve para producir una ganancia de carga estática en un fluido. Imprime pues una energía a un fluido, procedente de una energía mecánica que se ha puesto en su eje por medio de un motor. La bomba centrífuga es una turbomáquina de tipo radial con flujo de adentro hacia afuera, presentando por lo general un área de paso de agua relativamente reducida en relación con el diámetro del impulsor, con el objeto de obligar al fluido a hacer un recorrido radial largo y aumentar la acción centrífuga, a fin de incrementar la carga estática, que es lo que generalmente se pretende con este tipo de bomba.

Las partes esenciales de una bomba centrífuga son el impulsor provisto de álabes y la carcasa que está alojando el mismo, la cual forma un todo con la voluta o difusor, forma cónica del ducto de salida del rotor que permite transformar la energía cinética en energía potencial. A veces el difusor se presenta bajo la forma de una serie de álabes fijos a la carcasa, rodeando el impulsor, los cuales no sólo reducen la velocidad de salida y aumentan la carga estática, sino que también actúan como directores del agua a la salida, como sucede en las bombas de pozo profundo del tipo llamado de tazones, que tienen varios impulsores en serie.

Figura 2. Corte transversal bomba centrífuga



Las bombas centrífugas pueden ser de succión simple o doble; en las primeras, el agua ingresa por el ojo del impulsor en un solo lado de éste; pero cuando se requiere admitir más caudal sin aumentar el diámetro del ojo de entrada, lo cual reduce el recorrido radial y la carga, se dispone de la doble succión, la cual funciona haciendo ingresar el agua por los dos lados del impulsor. Es evidente que el área de paso, a través de los álabes, debe aumentar, lo cual se consigue separando los discos laterales que sirven de cubierta a los álabes.

Cuando se requieren muy altas presiones, se pueden disponer varias celdillas de impulsores en serie, con lo que se tiene una bomba multicelular. Si se desea aumentar el caudal, se pueden disponer varias unidades en paralelo.

La tubería de alimentación de una bomba centrífuga alcanza a la carcasa en dirección axial y el agua penetra en esa dirección en el ojo del impulsor. El agua en la bomba realiza su recorrido de adentro hacia fuera en dirección radial y sale por la periferia del impulsor. Se procura frecuentemente que no haya

giro del fluido en el momento de la incidencia en los álabes, con el fin de mejorar la eficiencia.

6.3.2. Tipos de impulsores y sus características

El impulsor es el corazón de una bomba centrífuga, ya que de él depende en su totalidad la eficiencia de la bomba.

Los impulsores de las bombas generalmente se fabrican de bronce fundido (85 % Cu, 5 % Zn, 5 % Sn y 5 % Pb), en acero inoxidable para aplicaciones en plantas alimenticias, y en ciertos casos de plástico o teflón cuando se bombean químicos corrosivos.

De acuerdo con su construcción mecánica, los impulsores se clasifican en: impulsores abiertos, impulsores cerrados e impulsores semiabiertos.

6.3.2.1. Impulsores abiertos

Un impulsor abierto consiste únicamente de álabes fijos a un mamelón central para montarse a un eje sin ninguna forma de paredes o placas de refuerzo. La desventaja de este impulsor es su debilidad estructural. Si los álabes son largos, deben reforzarse con costillas o una pared de refuerzo parcial.

En los impulsores abiertos, los álabes pueden ser del tipo bidimensional o tridimensional y sólo presentan una cubierta lateral en la que van engastados los álabes, total o parcialmente. El ducto entre los álabes se cierra con la pared de la carcasa, permitiendo la necesaria luz de entrehierro.

El impulsor abierto es menos eficiente que los impulsores cerrados, pero la ventaja de los impulsores abiertos es que pueden manejar materiales en suspensión con un mínimo de atascamiento.

La ineficiencia del impulsor abierto se debe a la recirculación del agua entre el impulsor y la carcasa, debido a la necesaria luz de entrehierro, aun dentro de los mejores ajustes. Dicha ineficiencia va aumentando a medida que el desgaste aumenta.

6.3.2.2. Impulsores semiabiertos

En este tipo de impulsor se incorpora una placa refuerzo o una pared posterior del impulsor. Esta pared puede o no tener álabes de bombeo exterior, que están ubicados en la parte posterior de la placa de refuerzo del impulsor. Su función es la de reducir la presión en el mamelón posterior del impulsor y evitar atascamiento de materiales en el otro lado del impulsor, que interfieren en la operación adecuada de la bomba y de la caja del estopero.

6.3.2.3. Impulsores cerrados

Es utilizado casi universalmente en bombas centrífugas para el manejo de líquidos corrientes, incorpora refuerzos o paredes laterales que encierran totalmente los canales del impulsor desde el ojo de succión hasta la periferia. Aunque este diseño evita que haya deslizamiento que ocurre entre un impulsor abierto o semiabierto y sus placas laterales, debe incorporarse una junta de escurrimiento entre el impulsor y la carcasa para separar las cámaras de succión y la descarga de la bomba. Esta junta está formada normalmente por una superficie cilíndrica relativamente corta sobre la pared del impulsor que gira

dentro de una superficie cilíndrica estacionaria ligeramente mayor. Si el eje de la bomba termina en el impulsor, de manera que el último está soportado por rodamientos en un lado, se llama impulsor volado. Este tipo de construcción es la mejor para bombas de succión al extremo con impulsores de succión simple.

En los impulsores cerrados, los álabes generalmente del tipo bidimensional tienen dos cubiertas laterales, con salida periférica del agua, constituyendo el conjunto todo el impulsor.

A continuación se muestran las figuras de los tres tipos de impulsores con el fin de hacer notar las diferencias en la construcción de los mismos.

Figura 3. Impulsor abierto

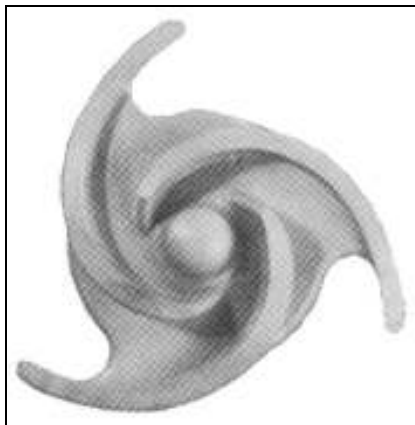


Figura 4. Impulsor semiabierto



Figura 5. Impulsor cerrado



6.3.3. Leyes de afinidad

Las leyes de afinidad expresan la relación matemática que existe entre las variables de operación en el desempeño de una bomba. La variación de la carga con la capacidad de la bomba, a velocidad constante, es una “característica de la bomba”.

Carga, caudal y potencia al freno en HP varían con la velocidad; tal forma de operación retiene sus fisonomías características. Éstas de variaciones se conocen como Leyes de Afinidad. Éstas se aplican a cualquier tipo de bomba centrífuga. Aplicando a cualquier punto de la curva carga-capacidad, estas leyes establecen que: cuando la velocidad cambia

- el caudal varía directamente con la velocidad;
- la carga varía directamente con el cuadrado de la velocidad; y
- la potencia al freno varía directamente con el cubo de la velocidad.

$$A. \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Donde:

$$B. \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

Q = caudal (GPM)
H = carga o cabeza (pies)
BHP = potencia al freno
N = velocidad de la bomba (RPM)

$$C. \frac{BHP_1}{BHP_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3$$

6.3.4. Curvas características de funcionamiento

El desempeño de una bomba centrífuga se puede observar gráficamente mediante las curvas características. En una curva típica se logra observar la cabeza dinámica total, la potencia al freno, eficiencia y la carga de succión total, todas graficadas sobre una escala de capacidad de la bomba.

En la figura 6 se muestra la manera en la que se logran observar las variables de operación de una bomba centrífuga, dicha gráfica es adimensional para una mejor comprensión.

Figura 6. Curva característica ideal

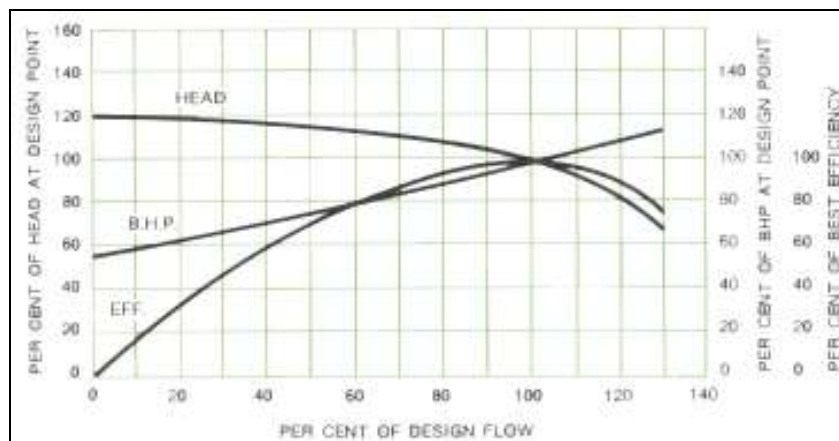
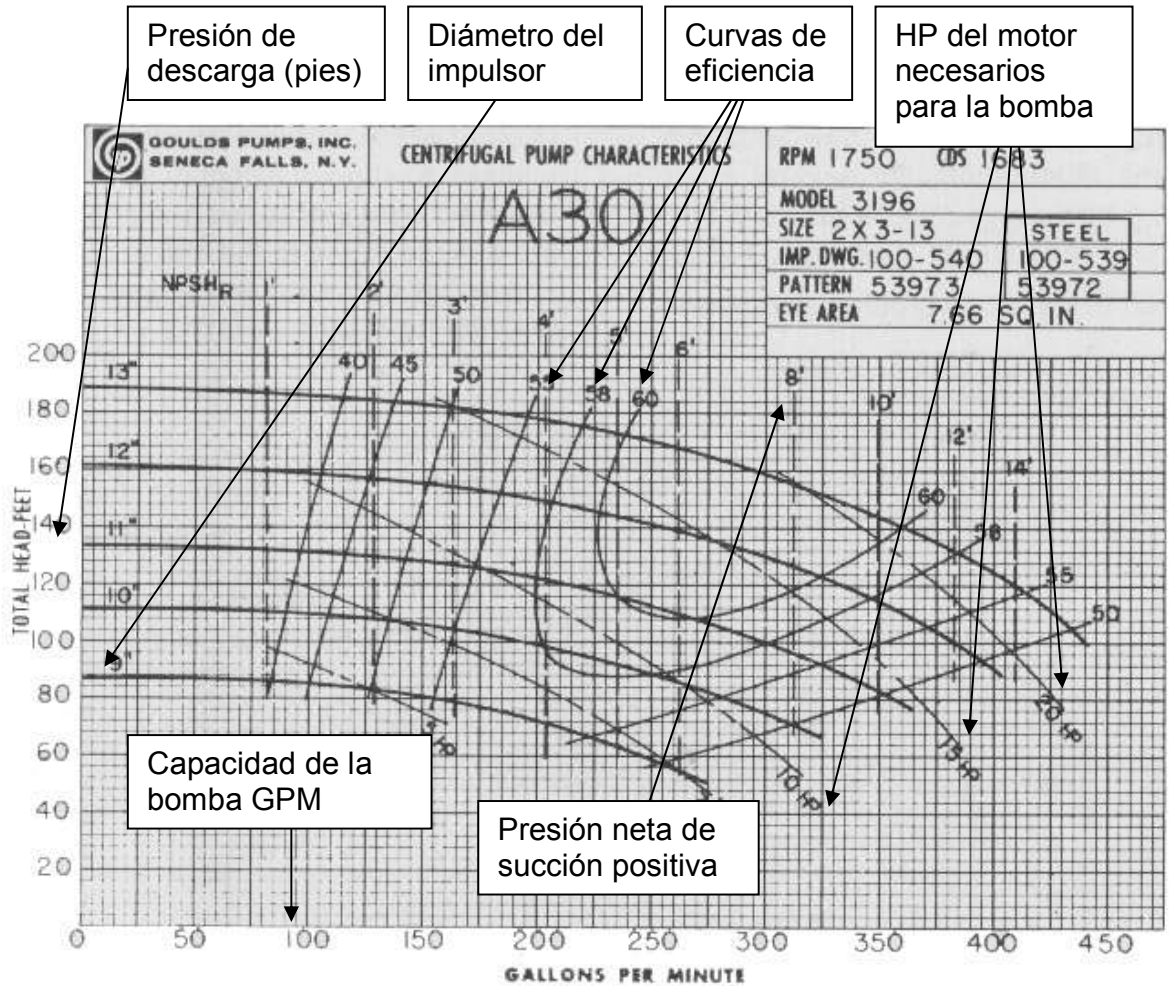


Figura 7. Curva característica real



6.3.5. Comparación entre una bomba centrífuga con velocidad constante y una bomba centrífuga operando con velocidad variable

Normalmente los sistemas de bombeo mantienen un flujo constante, con lo cual se utiliza una bomba que opera a una velocidad constante, pero existen algunos casos en los que el flujo del sistema en que opera la bomba varía considerablemente. Esto hace necesario que la bomba que se utilice opere entregando flujos variables que se adapten a la demanda, lo cual se consigue,

de acuerdo a las leyes de afinidad de las bombas centrífugas, variando la velocidad o variando la presión de descarga, de manera natural o por medio de una válvula de control.

Como anteriormente se mencionó, el flujo varía directamente con la variación de la velocidad, es decir las revoluciones por minuto de la bomba. La forma de variar la velocidad en una bomba centrífuga se hace mediante la variación de la frecuencia del motor que la bomba utiliza. Por lo tanto, mediante la variación de la frecuencia del motor de la bomba se consigue que la bomba varíe su capacidad en forma directamente proporcional a la velocidad, todo esto sin afectar la presión de descarga de la bomba.

6.4. Variadores de velocidad

Existen dos formas de variar velocidad, por medios mecánicos o por medios electrónicos. A continuación se mencionan los dos métodos de variar la velocidad de una bomba.

6.4.1. Cajas reductoras de velocidad

El problema básico en la industria es reducir la alta velocidad de los motores a una velocidad utilizable por las máquinas. Además de reducir se deben contemplar las posiciones de los ejes de entrada y salida, y la potencia mecánica a transmitir.

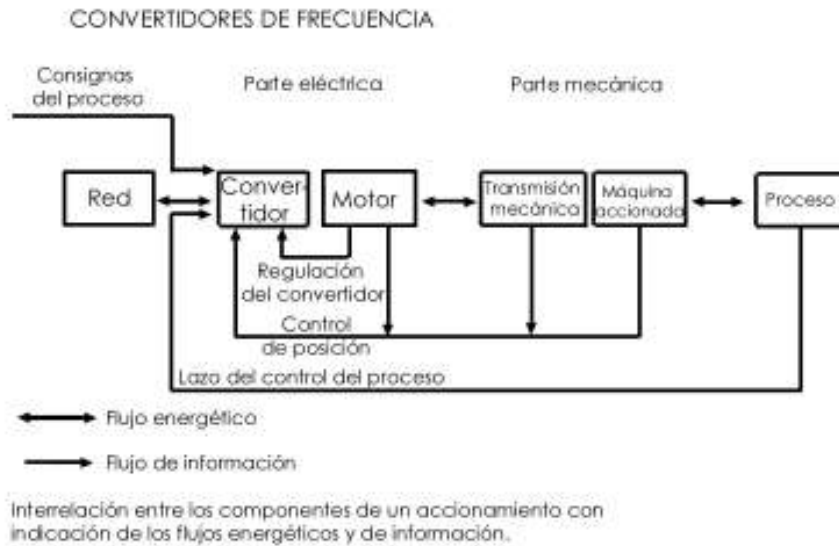
Para potencias bajas se utilizan moto-reductores que son equipos formados por un motor eléctrico y un conjunto reductor integrado. Las herramientas manuales en general (taladros, lijadoras, cepillos, etc) poseen moto-reductor.

Para potencias mayores se utilizan equipos reductores separados del motor. Los reductores consisten en pares de engranajes con gran diferencia de diámetros. De esta forma, el engrane de menor diámetro debe dar muchas vueltas para que el de diámetro mayor de una vuelta, así se reduce la velocidad de giro. Para obtener grandes reducciones se repite este proceso colocando varios pares de engranajes conectados uno a continuación del otro.

6.4.2. Variadores de velocidad electrónicos

Un variador de frecuencia toma la corriente alterna de la red de distribución, la convierte en corriente directa para poder adaptarse a las condiciones requeridas de frecuencia. La señal proveniente de un controlador ingresa a un algoritmo en el cual, por medio de comparaciones lógicas, ajusta la frecuencia de la corriente directa al requerimiento necesario. Luego se vuelve a convertir la corriente en alterna que se le suministra al motor para que funcione a la velocidad necesaria y de esta manera el equipo al que le transfiere la potencia realice el trabajo de la manera más eficiente.

Figura 8. Diagrama de funcionamiento variador de frecuencia



Se puede observar en la figura 8 que hay flujos energéticos y flujos de información, aquellos realizan el trabajo y estos son los que hacen que el trabajo esté de acuerdo con las consignas de presión, velocidad, posición, caudal, etc. Por lo tanto, los componentes de todo el sistema han de estar coordinados entre sí.

Los accionamientos modernos son casi siempre denominados controlados o regulados. En ellos existe un dispositivo interno llamado controlador o regulador, que compara continuamente la variable de proceso a mantener y en función de las desviaciones (o error) que tiene respecto de la consigna impuesta por el operador, o por un sistema de control de jerarquía superior hace que el órgano de ajuste ejecute las modificaciones pertinentes en la cadena energética del accionamiento.

3. SISTEMA PROPUESTO

7.1. Descripción del funcionamiento del sistema propuesto

El propósito principal es que las bombas del sistema sean capaces de entregar únicamente el flujo necesario con el mínimo consumo de energía posible y manteniendo constante la presión del sistema. Es por esto que se propone la utilización de un variador de velocidad, el cual será el encargado de variar la frecuencia del motor, según como sea la demanda de agua de enfriamiento.

De acuerdo con las leyes de afinidad de las bombas centrífugas, la variación de velocidad es directamente proporcional al flujo, por lo tanto, cuando exista baja demanda de agua de enfriamiento el variador de frecuencia disminuirá la velocidad del motor y la bomba entregará menor cantidad de agua; por el contrario, cuando la demanda del sistema aumente, el variador de velocidad aumentará la frecuencia del motor, con lo cual la bomba entregará mayor flujo de agua.

La manera en que el sistema detectará la demanda de agua de enfriamiento será mediante el monitoreo de la presión. Como anteriormente se mencionó, cuando la presión del sistema disminuye, significa que la demanda aumenta, y cuando la presión aumenta significa que la demanda disminuye. La presión será detectada por el transmisor de presión existente y éste enviará una señal de 4 a 20 mA a el PLC, el cual a su vez se encargará de enviar señal de aumento, disminución o velocidad constante a el variador de velocidad.

7.2. Selección de la bomba a utilizar

Es importante mencionar que no cualquier tipo de bomba se puede utilizar para operación con velocidad variable, existen ciertas características en el diseño de la bomba que hacen que algunas bombas operen de manera ineficiente con velocidad variable. De acuerdo con la experiencia, es importante que la curva característica de la bomba posea un rango reducido de variación de presión de descarga con relación a la variación de flujo para que la bomba desempeñe un trabajo en forma adecuada si se requiere que ésta trabaje con variación de velocidad.

7.2.1. Determinación del rango de funcionamiento de la bomba

En la siguiente tabla se muestran las necesidades de agua de enfriamiento de cada equipo de la sala de máquinas; además en la tabla se observan, de acuerdo a datos obtenidos en el área de operación, cuáles son los equipos que operan cuando existe producción alta, media y cuando existe producción baja. Todo esto con el fin de determinar cuál es el rango en el que la bomba se va a desempeñar.

Tabla I. Consumos de enfriamiento

Consumos de enfriamiento sala de máquinas (GPM)				
Equipo	Consumo teórico	Prod. alta	Prod. media	Prod. baja
Compresor Stal 1	170	170		
Compresor Stal 2	170	170	170	
Compresor Stal 3	85	85		85
Compresor Atlas 1	29.2			
Compresor Atlas 2	29.2			
Compresor Atlas 3	29.2	29.2	29.2	
Comp. Atlas 180 VSD	71.4	71.4	71.4	71.4
Comp. Cooper	70	70		
Comp. Centac	85			
Compresor de CO2 #1	80		80	
Compresor de CO2 #2	30	30	30	
Compresor de CO2 #3	30	30	30	
Compresor de CO2 #4	80	80		
Compresor Frick 1	25	25	25	25
Compresor Frick 2	25	25		
Compresor Frick 3	16	16	16	
Futuro	375	375	375	
Total	1400	1177	826.6	180

El rango en que el circuito cerrado opera, está entre 180 y 1200 GPM.

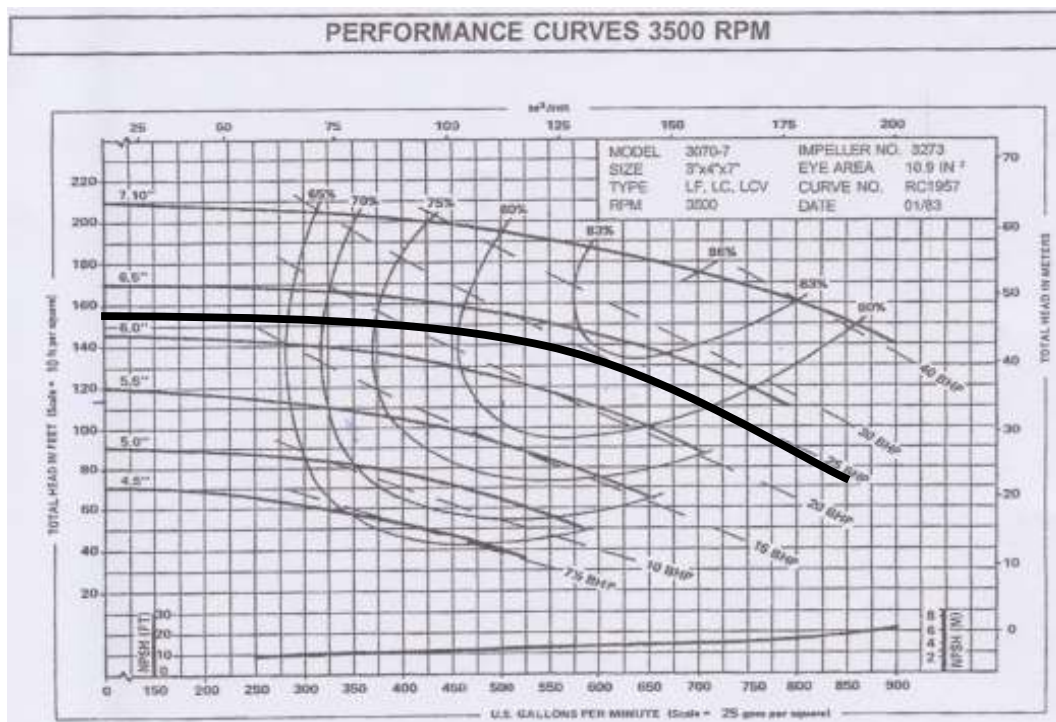
7.2.2. Rango de flujo

De acuerdo a la tabla I de consumos de enfriamiento, se determinó que el rango de flujo del circuito cerrado está entre 180 y 1200 GPM, considerando un porcentaje de seguridad. No se dimensiona la bomba para 1400 GPM

(consumo máximo teórico), debido a que en ningún momento operan todos los equipos de la sala de máquinas, incluso en horas de alta producción.

Es importante mencionar que actualmente se cuenta con una bomba que es capaz de entregar un flujo de 700 GPM operando a 110 ft (47 psi) de presión, con un impulsor de 6.3". La curva característica de operación de esta bomba se muestra en la figura 9.

Figura 9. Curva característica bomba actual



De acuerdo a un análisis detallado de distintas curvas de operación de bombas de distintos fabricantes, se logró encontrar una bomba que opera eficientemente en los tres puntos de operación promedio del circuito cerrado (180, 826 y 1177 GPM), consumiendo menos energía que si se utiliza la bomba

actual entregando 700 GPM. Por ejemplo, observando la curva de la figura 9, a 110 pies de cabeza la bomba consume 25 HP (18.65 KW), mientras que la bomba seleccionada a las mismas condiciones consume 24HP (17.9 KW). Una diferencia de 1 HP en una hora es insignificante, pero haciendo un análisis para 1 año (8760 horas) nos damos cuenta que representa una diferencia de \$780.00. Es por esta razón que se utilizará la bomba de 700 GPM únicamente como soporte al sistema; es decir que, en caso de una falla o mantenimiento preventivo de la bomba seleccionada, trabajará la bomba actual.

Además, bomba actual de 700 GPM no se puede utilizar para variar velocidad debido a que se necesita llegar a un flujo mínimo de 180 GPM, flujo que esta bomba puede entregar pero en pésimas condiciones de eficiencia, aproximadamente 45 %, condición que no traería valor agregado a la inversión en un variador de velocidad. Por aparte, si se observa la figura 9, la curva del impulsor muestra un rango muy amplio de presión a lo largo del flujo que es capaz de entregar, situación que es riesgosa a la hora de querer variar velocidad en una bomba, debido a que podrían ocurrir variantes en la presión de descarga.

Por lo tanto, la bomba seleccionada deberá ser capaz de entregar desde 180 hasta 1200 GPM en forma eficiente.

7.2.3. Rango de velocidades

De acuerdo a la figura 10, las velocidades a las que va a operar el motor de la bomba serán de:

- a 1177 GPM la velocidad del motor será de 1690 rpm
- a 826 GPM la velocidad del motor será de 1588 rpm

- a 180 GPM la velocidad del motor será de 1450 rpm.

La velocidad del motor de la bomba fluctuará entre 1450 y 1690 rpm para poder entregar el flujo según la demanda de agua de enfriamiento de los equipos de la sala de máquinas. Con este diseño la bomba tiene aun capacidad para absorber cargas de enfriamiento futuras, llegando como máximo a 2400 rpm, según los datos del fabricante.

7.2.4. Presión a la cual funcionará

La presión del sistema está dada por la caída de presión de los intercambiadores de calor más la presión requerida para vencer el sistema de tuberías, torres de enfriamiento y bombas.

Para la presión a la cual debe funcionar el circuito cerrado existe una limitante, la cual es el interenfriador de un compresor de CO₂, el cual funciona como mínimo a 40 psi de agua de enfriamiento a la entrada al intercambiador de calor. Por lo tanto, el sistema se deberá ajustar a 47 psi, lo cual equivale a 110 pies de cabeza total de la bomba. Los 7 psi extras son la caída de presión del circuito cerrado.

7.2.5. Determinación del tipo de bomba a utilizar

De acuerdo al análisis de las bombas existentes en el mercado, la que mejor se adapta a las condiciones del circuito cerrado es una bomba horizontal.

7.2.6. Selección final del modelo y características de la bomba

Marca: Goulds Pump

Modelo: 3196 MT

Flujo max: 2150 GPM

Diámetro impulsor: 12.56"

Material impulsor: bronce

Presión descarga: 47 psi (110 pies)

Eficiencia máxima: 83.5 %

Potencia req. max: 41 @ 1177 GPM

Diámetro succión: 6"

Diámetro descarga: 4"

Carcasa de acero fundido.

Peso bomba: 328 lbs

Figura 10. Dimensiones de la bomba (mm)

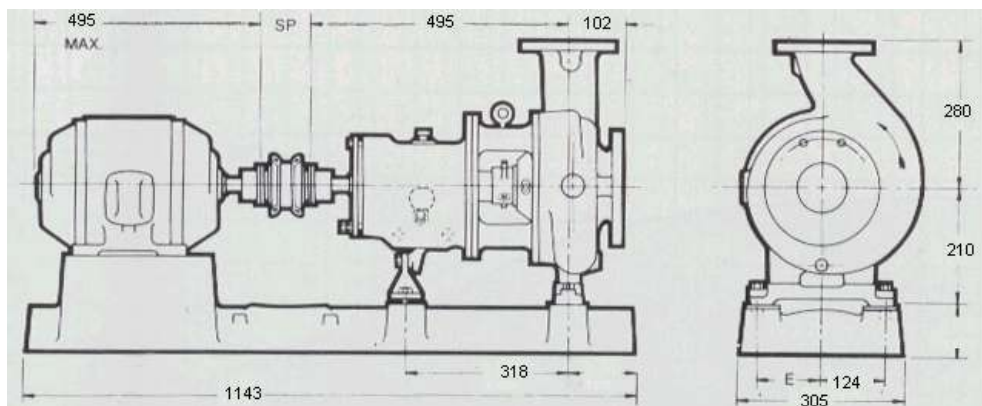
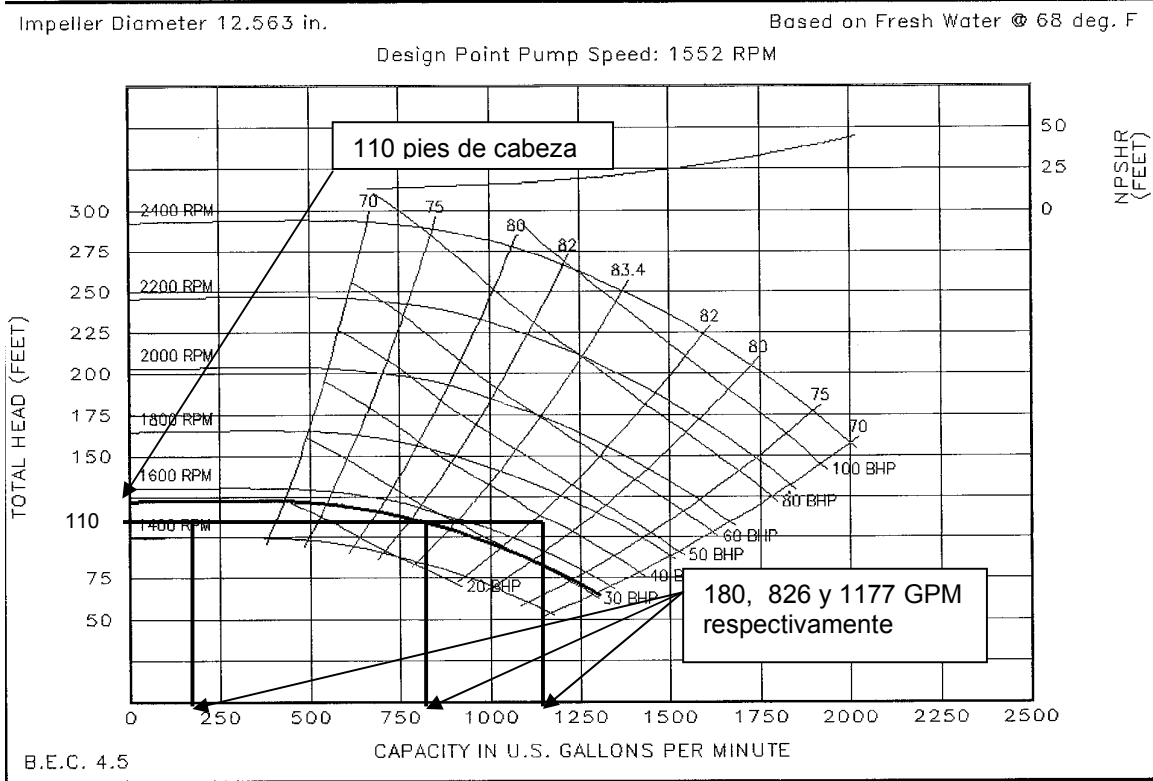


Figura 11. Curva característica, bomba seleccionada



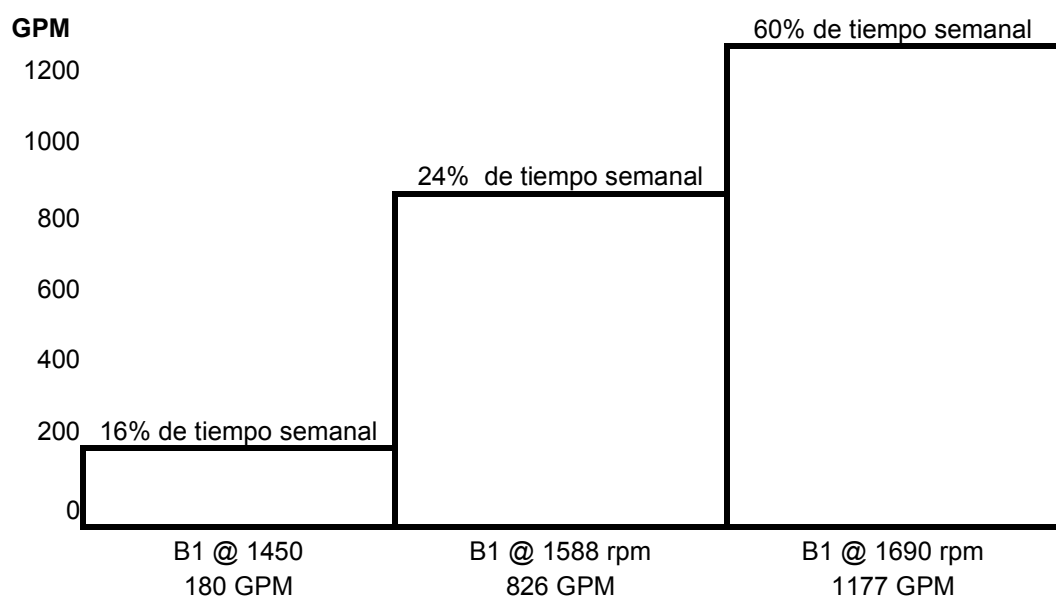
Como se puede observar en la figura 10, la bomba que funcionará con velocidad variable será la única encargada de entregar al sistema el flujo de agua necesario para poder enfriar los equipos. Claro que, como se menciona anteriormente, se dejará la bomba B1 de 700 GPM, además de una de las bombas pequeñas B2 que actualmente se están utilizando en “stand by”, es decir que se dejará conectada y lista para operar en caso de que la otra bomba falle o se le dé mantenimiento. Como en el primer capítulo se menciona, el enfriamiento de maquinaria es básico, en ningún momento puede dejar de funcionar el circuito cerrado, ya que esto provocaría el paro de la mayoría de los procesos de la fábrica que dependen de servicios como el aire, refrigeración y gas carbónico.

La bomba entregará una cabeza total de 110 pies, para lo cual el sistema se diseñará para que se mantenga constante esa presión. Además de la curva de operación se logra observar que entre 550 y 1200 GPM, la bomba operará en su mejor rango de eficiencia, entre 75 y 82%, aprovechando al máximo la energía que le es suministrada por el motor. Por aparte es importante mencionar que en 180 GPM la bomba funcionará con una frecuencia de 36 Hz, la cual no es crítica para la ventilación del motor.

La secuencia de funcionamiento de las bombas del circuito cerrado será de la siguiente manera:

- Producción baja (180 GPM) : operando la bomba B1 disminuyendo su velocidad a 1450 rpm.
- Producción media (826 GPM): operando la bomba B1 de velocidad variable a 1588 rpm.
- Producción alta (1177 GPM): operando la bomba B1 de velocidad variable a 1690 rpm.

Figura 12. Distribución porcentual del tiempo



En la figura 11 se puede observar gráficamente la manera en que el circuito cerrado va a operar, en la grafica se puede observar la demanda en GPM, el flujo que la bomba dará en cada tipo de demanda y las rpm de la bomba B1 que utilizará variador de velocidad. Hay que notar que la mayor demanda es la que se presenta en la mayor parte del tiempo, por lo tanto esas condiciones de operación (1177 GPM) fueron las determinantes para escoger la bomba que se utilizará, ya que con esto se logra obtener el mayor ahorro anual.

7.3. Análisis económico

A continuación se hace un análisis económico basado en las condiciones actuales, comparándolo con las condiciones que existirán en el sistema de bombeo propuesto, con lo cual se podrá tener una buena referencia acerca de la factibilidad de su implementación.

7.3.1. Cálculo de los ahorros por consumo de energía eléctrica

Tabla II. Consumos de energía

CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

	Max. teórico	Prod. alta	Prod. media	Prod. baja
Horas de operación/semana		100	48	20
Actual (HP)	64.2	59.7	38.6	11.9
Propuesto (HP)	44.2	41.0	27.8	8.7

	TOTAL HP/SEM	US\$ / año
ACTUAL	8067.5	\$ 37,554.51
PROPUESTO	5609.9	\$ 26,114.40
DIFERENCIA	2457.6	\$ 11,440.11

Como se puede notar en el cuadro anterior, el análisis de consumos de energía se hizo para una semana de operación, separando la semana de

acuerdo a como se comporta la operación de la sala de máquinas, en producción alta, media y baja. La suma de las horas de operación de los tres intervalos de producción es de 168, o sea 7 días por 24 horas. Luego se presenta el total de potencia consumida en una semana para los dos escenarios, el actual y el propuesto; la diferencia del consumo propuesto y el actual para una semana es de 2200.7 HP, lo cual representa un ahorro anual de \$ 11,440.21.

7.3.2. Cálculo de los ahorros por mantenimiento de equipos

Tabla III. Costos de mantenimiento

MANTENIMIENTO DE BOMBAS	US\$
ACTUAL	\$ 960.00
PROPUESTO	\$ 400.00
DIFERENCIA	\$ 560.00

El ahorro total es de \$ 12,000.21, lo cual incluye energía eléctrica y mantenimiento.

7.3.3. Detalle de los costos para la implementación del sistema

Bomba marca Goulds:	\$ 1,700.00
Arrancador:	\$ 450.00
Válvulas succión, descarga y cheque:	\$ 150.00
Instalación bomba:	\$ 200.00
Variador de velocidad:	\$ 2,500.00
Total	\$ 5,000.00

7.3.4. Cálculo del retorno de la inversión

Ahorro anual: \$ 10,804.32

Costo de inversión: \$ 5,000.00

Retorno de inversión: $5,000.00 / 12,000.21 = 0.41$ años

$0.41 * 12 = 5$ meses

Por lo tanto, debido a que el ahorro anual de la operación del sistema del circuito cerrado propuesto es mayor que el monto de la inversión, el retorno de la misma se va a tener en 5 meses.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

8.1. Anclaje de la bomba

Debido a que la ubicación de la bomba será en el mezanine de la sala de máquinas, el cual es de rejilla de hierro, se soldarán a éste placas de hierro negro cuadradas (15 cm de lado, 1/2 " de espesor, con un agujero al centro de 3/4 " de diámetro). Dichas placas se soldarán a la rejilla en las partes donde los agujeros de la base de la bomba casen para anclarla. Luego se deberá proceder a anclar la bomba utilizando tornillos de 3/8 " con sus respectivas tuercas y arandelas. Es importante que la bomba quede nivelada para lograr un buen aspecto visual y no caer en la necesidad de soldar tubos a diferentes ángulos.

Cuando ya se tenga la bomba perfectamente anclada, se puede proceder a instalar la tubería y válvulas para unirla al manifold de distribución de agua de enfriamiento.

8.2. Válvulas de succión y descarga

Se utilizarán válvulas de mariposa con cuerpo de hierro negro y mariposa de acero inoxidable. Se seleccionaron válvulas de mariposa debido a que se pueden maniobrar fácilmente, presentan menor pérdida de presión que los demás tipos de válvulas y no se necesita regular flujo por medio de ellas. Para la succión se utilizará de 6" y para la descarga de 4". Además, en la descarga se instalará un cheque horizontal de 4" de bronce. Las válvulas y el cheque se deberán unir a la tubería por medio de bridas, las cuales se deben soldar a la tubería y por medio de pernos sujetarán las válvulas haciendo presión.

En la succión, para fines de proteger el impeler de la bomba se utilizará un filtro de acero inoxidable de 6”.

8.3. Transmisor de presión

Se utilizará el transmisor de presión con el que se cuenta actualmente, el cual es de tipo capacitivo, es decir que la presión que actúa sobre un fuelle hace que éste cambie de posición, variando la capacitancia existente entre las placas del mismo, y con esto emite una señal de 4 a 20 mA dependiendo de la capacitancia.

8.4. Controlador

Al igual que el transmisor de presión, se utilizará el controlador o PLC que está instalado actualmente. La función de este es bastante importante, ya que es el cerebro que mandará en el circuito cerrado para su adecuado desempeño.

Vale la pena mencionar que el principal propósito del controlador será mantener constante la presión del circuito cerrado, la cual será de 47 psi.

Al controlador le va a llegar una señal de entrada proveniente del transmisor de presión, esta señal la va a comparar con el valor de consigna, y de ser diferente a éste, el controlador enviará una señal de salida ya sea para aumento o disminución de velocidad de la bomba, todo esto dependiendo de las condiciones de operación en que se encuentre el sistema del circuito cerrado en determinado momento.

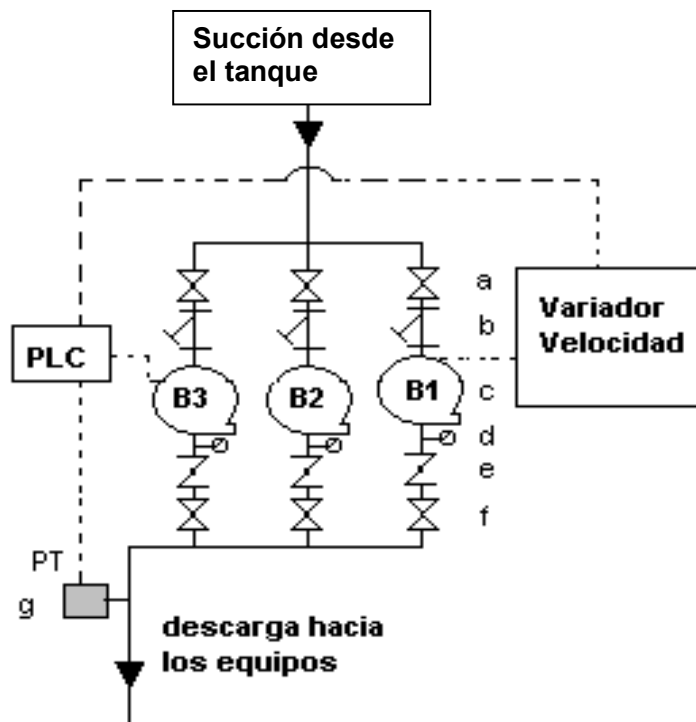
8.5. Variador de velocidad

Para poder satisfacer las necesidades del sistema se debe adquirir un variador de velocidad que cumpla con los HP necesarios. Por lo tanto se necesita un variador para 45 HP, puesto que la potencia al freno (a 1200 GPM y 47 psi de presión) de la bomba es de 41 HP.

Es importante recalcar que la frecuencia a la que éste funcionará es directamente proporcional al flujo de la bomba, el rango de la frecuencia será de 1450 a 1690 rpm.

8.6. Diagrama de instalación

Figura 13. Diagrama de instalación



Como se puede observar en la figura 13, la bomba B1 es la que se debe comprar y que funcionará con el variador de velocidad; la señal de arranque irá desde el PLC al variador de velocidad. La bomba B3 y B2 son las bombas que actualmente están funcionando en el circuito cerrado, la señal de arranque para éstas irá del PLC al motor de la bomba directamente.

A continuación, para un mejor entendimiento se describe la nomenclatura del diagrama:

- a) válvula de succión
- b) filtro
- c) bomba
- d) manómetro
- e) cheque
- f) válvula de descarga
- g) transmisor de presión

Es bastante importante que la instalación de los accesorios se haga en el orden indicado en el diagrama, ya que ésta es una forma bastante práctica para el mantenimiento de las bombas.

5. SEGUIMIENTO

9.1. Lista de chequeo de las bombas

Además de los procedimientos de inspección que se utilizan actualmente para los demás equipos de la sala de máquinas, se recomienda llevar el siguiente formato para la inspección de las bombas del circuito cerrado:

Figura 14. Lista de chequeo

LISTA DE CHEQUEO BOMBAS CIRCUITO CERRADO						
Bomba 1				Bomba 2		
Hora	Nivel aceite	presión desc.	Ruidos	Nivel aceite	presión desc.	Ruidos
00:00						
02:00						
04:00						
06:00						
08:00						
10:00						
12:00						
14:00						
16:00						
18:00						
20:00						
22:00						
OBSERVACIONES: _____						

9.2. Mantenimiento de la bomba

9.2.1. Sellos Mecánicos

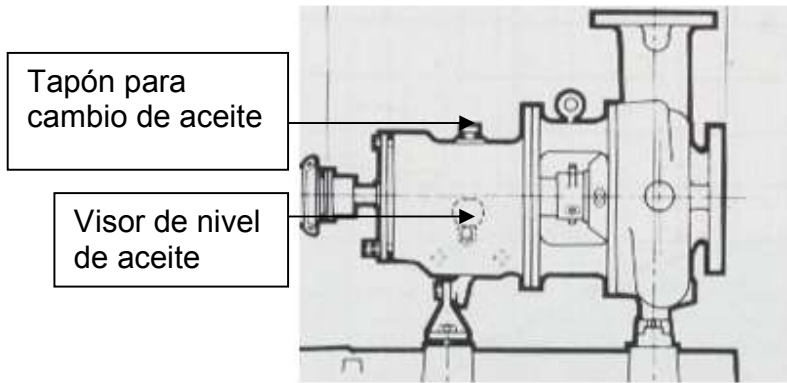
La vida útil de un sello mecánico depende de varios factores como la limpieza del líquido a bombear y las mismas propiedades de lubricación de dicho líquido. Importante: nunca se debe operar la bomba sin que llegue líquido de bombeo al sello mecánico. Operar el sello mecánico en seco, incluso por algunos segundos, puede causar daños al sello. Si falla, la bomba puede sufrir daños físicos. El sello mecánico es un aislamiento del fluido entre las partes rotativas y las partes estacionarias de una bomba, por lo tanto es importante darle un seguimiento detallado a esta parte de una bomba centrífuga.

9.2.2. Revisión de nivel de aceite

Debido a que la bomba posee cojinetes lubricados por aceite, es necesario que el operador realice inspecciones periódicas, con el fin de prevenir que los cojinetes de la bomba trabajen en seco, lo cual trae consecuencias bastante serias. Los puntos de revisión de nivel y cambio de aceite se muestran en la figura 14. El nivel de aceite se debe mantener por encima de la línea central del visor cuando la bomba está operando.

El fabricante recomienda cambiar el aceite después de 2000 horas de operación o cada 3 meses, lo que ocurra de primero. El aceite a utilizar deberá poseer inhibidores de corrosión y oxidación. Para la mayoría de las condiciones de operación los cojinetes operarán a temperaturas entre los 50 °C y 82 °C, en ese rango de operación se debe utilizar un aceite ISO grado 68 a 40 °C.

Figura 15. Nivel de aceite de la bomba



CONCLUSIONES

1. Es importante que el ingeniero sepa que no todas las bombas centrífugas están diseñadas para funcionar con velocidad variable. El diseño del impulsor juega un papel muy importante en el desempeño de la bomba, de él dependerá la cantidad de flujo, la presión y la eficiencia a la que la bomba entregará el fluido. Hay que fijar la atención en la curva característica de la bomba, para que pueda funcionar eficientemente a velocidad variable es necesario que mantenga un rango de presión más o menos constante desde su flujo mínimo hasta el flujo máximo que la bomba sea capaz de entregar.
2. La limitante para la variación de velocidad en una bomba es la ventilación del motor, esto depende de los rpm a los que gira. Existe una limitación para la mínima velocidad a la que puede girar el motor la cual es del 20 % de la velocidad nominal por lo tanto para la bomba seleccionada es de 710 rpm, siendo 3550 rpm su velocidad nominal.
3. Como se menciona en el contenido del trabajo, el sistema está diseñado para mantener una presión constante, la cual es de 47 psi debido a una limitante de presión de uno de los equipos a enfriar.
4. Para el sistema de bombeo se propone la utilización de dos de las bombas actuales, además de la compra de una bomba marca Goulds Pump, modelo 3196 MT, con un impulsor de 12.75 “ de diámetro.

5. La instrumentación necesaria es un transmisor de presión, un PLC o controlador de lógica programable y el variador de velocidad para una potencia de 45 HP.
6. El ahorro obtenido con la operación del sistema propuesto, tomando en cuenta mantenimiento y consumo de energía eléctrica, será de \$ 12,000.21 anuales.
7. Debido a que los ahorros calculados para el sistema propuesto son mucho mayores a el costo de la implementación del sistema, la inversión se logra recuperar en 5 meses.

RECOMENDACIONES

1. En la instalación de la bomba se recomienda utilizar un reductor excéntrico en la succión de la bomba, para evitar la formación de pequeñas burbujas de aire que puedan provocar cavitación en la bomba y dañar el impulsor. Además es importante que en la tubería de succión, antes de la boca de la bomba, debe quedar una distancia libre de accesorios de por lo menos 2 veces el diámetro de la bomba (como mínimo 8 pulgadas).
2. Debido a que en una de las bombas se utilizará velocidad variable, es importante tener presente que la ventilación del motor a utilizar depende de las revoluciones del mismo, y si en algún momento se necesitara disminuir su velocidad al límite que es 480 rpm, la eficiencia de enfriamiento se verá afectada. Se recomienda utilizar un motor con aislamiento tipo F “inverter dutty”, para prevenir algún riesgo por sobrecalentamiento. Otra solución factible, si no se contara con un motor con aislamiento tipo F es colocar otro ventilador detrás del ventilador del motor, que gire a 60 Hz o 3550 rpm que es la velocidad nominal de la bomba, con esto la bomba puede disminuir su velocidad a menos del 20 % sin ningún problema.

BIBLIOGRAFÍA

1. MANUAL, Goulds Pump. Estados Unidos. 672 pág.
2. MANUAL, Johnston engineering data. Estados Unidos. 440 pág.
3. MERINO, José María. Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna. España: Editorial Mc Graw Hill, 1998. 430 pág.
4. POLO, Manuel. Turbomáquinas hidráulicas. México: Editorial Limusa, 1975. 262 pág.
5. RIVAS, José. Consideraciones sobre diseño de álabes para impulsores de bombas centrífugas. Tesis de Ing. Mecánica. Guatemala, USAC. Facultad de Ingeniería. 1975. 116 pág. (Generalidades de bombas centrífugas y tipos de impulsores)
6. <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/engrana/crema.html>