



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Programa Único de Especializaciones de
Ingeniería**

**Análisis de la eficiencia
energética de una planta de
bombeo de aguas
combinadas**

TESINA

Que para obtener el título de
**Especialista en Ahorro y Uso Eficiente
de Energía**

P R E S E N T A

Ing. José Miguel Canchola Fuentes

DIRECTOR DE TESINA

Dr. Eduardo Medina Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo I. Marco contextual.....	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Descripción de la planta de bombeo	3
1.3. Datos Hídricos.....	4
1.4. Justificación para el análisis del sistema de bombeo	5
1.5. Objetivos.....	5
Capítulo II. Marco teórico.....	6
2.1. Conceptos hidráulicos.....	6
2.1.1. Equipos de bombeo	6
2.1.2. Clasificación de equipos de bombeo	6
2.1.3. Clasificación de bombas centrífugas	11
2.1.4. Tipos de bombas centrífugas.....	12
2.1.5. Carga de bombeo	13
2.1.6. Carga dinámica total (CDT)	13
2.1.7. Pérdidas de carga en tuberías	14
2.1.8. Potencia hidráulica.....	17
2.1.9. Potencia al freno (Brake Horsepower)	17
2.1.10. Curva del sistema	17
2.1.11. Curvas características de las bombas	20
2.1.12. Punto de operación.....	21
2.1.13. Cavitación	22
2.1.14. Bombeo en serie.....	23
2.1.15. Bombeo en paralelo.....	23
2.1.16. Leyes de afinidad.....	25
2.2. Conceptos eléctricos.....	26
2.2.1. Motores eléctricos.....	26
2.2.2. Diferencia de potencial	26
2.2.3. Intensidad de corriente	26
2.2.4. Factor de potencia	26

2.2.5. Potencia eléctrica.....	27
2.2.6. Consumo de energía eléctrica	27
2.2.7. Demanda eléctrica	27
Capítulo III. Análisis del sistema de bombeo.....	28
3.1. Cálculo hidráulico de las bombas	28
3.1.1. Curvas características de las bombas	29
3.1.2. Potencia al freno	31
3.1.3. Net Positive Suction Head (NPSHr).....	32
3.2. Construcción de la curva del sistema	33
3.3. Punto de operación.....	35
3.4. Cálculo de la curva característica de la bomba mediante la medición del gasto	37
3.5. Eficiencia del conjunto bomba-motor	37
3.5.1. Cálculo de la potencia de salida de la bomba.....	38
3.5.2. Medición de la potencia de entrada al motor	39
3.5.3. Cálculo de la eficiencia del conjunto bomba-motor.....	39
Capítulo IV. Propuestas de ahorro y uso eficiente de energía.....	42
4.1. Operación diaria de la planta de bombeo	42
4.2. Propuestas sin inversión.....	42
4.2.1. Diseño de plan de bombeo con un equipo por descarga.....	42
4.2.2. Diseño de plan de bombeo con dos equipos por descarga	44
4.3. Análisis de propuesta sin inversión	44
4.3.1. Plan de bombeo de un equipo por descarga	45
4.3.2. Plan de bombeo de dos equipos por descarga.....	45
4.3.3. Comparativo de planes de bombeo	46
4.3.4. Costo mensual de la energía consumida por el sistema para la temporada seca	48
4.4. Propuesta con inversión.	51
4.4.1. Sustitución de motores eléctricos	51
4.4.2. Instalación de variadores de frecuencia.....	51

Capítulo V. Resultados	53
5.1. Conclusiones.....	55
 Bibliografía.....	 56
 ANEXOS	 57
Anexo 1. Información CFE.....	57
Anexo 2. Información Bombas INDAR	58
Anexo 3. Valores de K para pérdidas por accesorios.....	60
Glosario de figuras	61
Glosario de tablas	62
Nomenclatura	64
 Referencias	 <i>¡Error! Marcador no definido.</i>

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Los sistemas de bombeo constituyen una parte vital dentro de las ciudades, desde el bombeo de agua para consumo, hasta el agua residual que desechamos después de su consumo.

Bombear agua se ha convertido en una tarea bastante compleja, pues la demanda de la misma ha aumentado en consecuencia del incremento de la población y del sector comercial. Normalmente se pone una atención especial por parte de los usuarios al transporte de agua limpia para el consumo y se le da una importancia menor al agua que se desecha diariamente.

La infraestructura hidráulica de la ciudad ha tenido que crecer muy rápido y en muchas ocasiones, las obras públicas que se realizan no consideran el desarrollo urbano que puede tener la zona, por lo que las plantas de bombeo y los sistemas de tuberías trabajan en un punto cercano al de su máxima capacidad.

Anticipando posibles problemáticas en el sistema de aguas en la ciudad, es conveniente la realización de una evaluación del comportamiento hidráulico que nos permita conocer la capacidad real de nuestros instrumentos de bombeo, pues son la única herramienta que evita que la ciudad entre en caos en temporada de lluvias.

Actualmente, cualquier instalación eléctrica debe de ser evaluada para conocer su comportamiento y así poder encontrar posibles áreas de mejora para el aprovechamiento de nuestros recursos energéticos, así como de nuestros equipos, buscando aumentar su vida útil.

Para el caso de instalaciones de bombeo como la que se presenta y sus símiles, la metodología para una correcta evaluación relaciona estudios hidráulicos y eléctricos, en vez de aislarlos como casos de estudio diferentes. Esto nos permite conocer con mayor detalle el comportamiento de todos los equipos así como la interacción que tienen entre si al momento de estar en operación.

Detallar el cambio de cada variable en función de una variable general ayuda en una mejor interpretación del funcionamiento de la planta y permite encontrar áreas de oportunidad para la mejora continua.

La planta de bombeo que se presenta en este estudio fue construida por el incremento de agua residual existente en la zona y la incapacidad que presentaban las plantas de bombeo cercanas para extraer el agua proveniente de la zona. Esta planta de bombeo tiene ya algunos años en operación por lo que resulta conveniente realizar un análisis de

sobre cómo opera actualmente pues existen dos factores que pueden indicar un aumento en el volumen de agua que llega al cárcamo, estos son el crecimiento urbano de la zona que se conecta al sistema de tuberías de desagüe que llegan a la planta, así como el hundimiento diferencial que se ha hecho presente en la zona, pues parte del volumen de agua que estaba destinado a otras de las plantas de bombeo ubicadas en la zona de está yendo a la planta de estudio.

Es para ello que se debe realizar un análisis de las condiciones actuales de la planta de bombeo. Este estudio incluye un análisis de las condiciones hidráulicas de la planta y otro de las condiciones eléctricas con los cuales se puede observar cómo trabajan las bombas.

El estudio de las condiciones hidráulicas debe de incluir un análisis de la capacidad de descarga de los equipos instalados, para lo cual se debe observar el gasto de cada bomba con respecto al nivel de cárcamo.

En cuanto al estudio de las condiciones eléctricas registra la potencia de los motores y otras variables que mostrarán la demanda real que presentan los equipos.

Analizando estos datos en conjunto, se conocerá la forma en la cual está siendo operada la planta de bombeo y esto nos dará un indicio de donde poder enfocarnos para mejorar, si es que es el caso, tanto su capacidad de descarga como el uso de la energía.

Con esto se espera obtener una mejora en la eficiencia de la planta, así como ahorros tanto en el consumo de la energía como en la parte económica.

Para el caso particular de éste trabajo, se estudia únicamente la temporada seca del año con el fin de considerar un volumen de agua constante a la entrada para el llenado del cárcamo lo cual es válido pues más de la mitad del año se encuentra dentro de la temporada seca.

Quedado definido el perfil hidráulico, se establecen los niveles de operación de diseño de la planta de bombeo, estos se reflejan en la Tabla 1-1 que aparece a continuación.

Tabla 1-1. Niveles de operación de la planta de bombeo (fuente: SACMEX)

MSNM	Cárcamo vacío [m]	Cárcamo lleno [m]	Sensor	Nivel de operación	Observaciones
2233.10	0	11.67	-	-	N.P.O. (Nivel de Piso de Operación)
2229.60	3.50	8.17	4.5	4.5 / 0	N. Máx. Crítico (A 0.22 m de que haya brote en el punto más bajo en calle Cañaverales)
2229.10	4.00	7.67	4	4 / 0	N. Máx. (Inicio de bombeo)
2224.98	8.12	3.55	0	0	Nivel Cero (Mitad del colector de llegada)
2223.98	9.12	2.55	-1	0 / 1	N. Min. (Fin de bombeo)
2222.98	10.12	1.55	-2	0 / 2	N. Min. Crítico (Nivel mínimo para evitar daños del equipo)
2221.43	11.67	0	-	-	N.P.C. (Nivel de Piso de Cárcamo)

1.3. Datos Hídricos

En la Tabla 1-2 se muestra el volumen anual total de agua combinada, la cual se conforma por agua de desecho más agua de lluvia, que se maneja en la planta y refleja tanto temporada de seca, como temporada de lluvia.

Tabla 1-2. Volúmenes de agua combinada manejados en la planta (fuente: SACMEX)

Año	Litros
2014	14,084,690,000
2015	13,268,820,000
2016	12,675,600,000
2017	16,676,700,000
Del mes de enero a septiembre de 2018	12,644,820,000

La metodología de operación ha tenido que modificarse del plan original por el incremento volumétrico de la descarga a la planta de bombeo debido al desarrollo urbano de la zona y los hundimientos diferenciales de la zona, los cuales desvían el caudal que va a otra de las plantas de bombeo hacia la planta del estudio, adjudicando a los operarios una mayor responsabilidad en cuanto a la supervisión del control del nivel de agua en el cárcamo, este canal no maneja siempre un flujo constante ya que

transporta aguas combinadas (agua pluvial y agua residual) por lo que la lluvia puede provocar problemas en el control de ese nivel.

Este trabajo se enfoca al estudio del comportamiento de la planta de bombeo en temporada seca excluyendo los periodos de lluvia donde el caudal de entrada varía dependiendo de este factor.

1.4. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Dado que la demanda de bombeo de aguas residuales seguirá incrementando, debido al crecimiento urbano de la zona sur que alimenta el sistema de aguas residuales conectado a la planta de bombeo, se debe de evaluar la capacidad de operación de las bombas de la planta así como la metodología de operación que está siendo utilizada, para aproximarse a la máxima eficiencia de bombeo a la que se puede aspirar dadas las condiciones de diseño de la planta.

1.5. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

- Verificar el cumplimiento de la NOM-006-ENER-2015 “Eficiencia energética electromecánica en sistema de bombeo para pozo profundo en operación, límites y método de prueba”.
- Hallar el rango óptimo de operación de la Planta de Bombeo.
- Analizar la eficiencia de las bombas de la Planta de Bombeo.
- Hacer una propuesta viable para el ahorro y uso eficiente de energía.

Capítulo II. Marco teórico

2.1. Conceptos hidráulicos

2.1.1. Equipos de bombeo

Se puede definir al equipo de bombeo como un conjunto mecánico el cual se conforma por una bomba y un motor que sirve como accionador, éste suministra energía mecánica a la bomba la cual a su vez la convierte en energía cinética y de presión (potencia hidráulica) que el fluido adquiere para continuar con su transporte a través del sistema hidráulico¹.

Para el caso particular de este estudio, un equipo de bombeo de pozo profundo (con sistema de cárcamo) es utilizado para cambiar de posición al agua con la que se llena al cárcamo a través del sistema de alcantarillado de la zona y elevarla hacia la descarga la cual a su vez manda esta agua a un río de descarga.

En los casos donde los equipos de bombeo no muestran cambios significativos en cuanto a elevación o diferencias de presión considerables, estos generalmente se utilizan para adicionar energía en forma de velocidad.

2.1.2. Clasificación de equipos de bombeo

Existen diversas clasificaciones para los equipos de bombeo, cada una toma como criterio una característica diferente. Uno de estos criterios se basa en el principio por el cual se adiciona energía al fluido, a partir de esta clasificación se puede generalizar y dividir en dos grupos²:

a) Desplazamiento positivo:

Equipo de bombeo en el cual la energía se suministra de forma periódica mediante la aplicación de fuerza a uno o más elementos móviles para desplazar un número deseado de volúmenes de fluido, lo que resulta en un incremento directo en la presión

b) Dinámicas:

Equipo de bombeo en el cual se tiene un suministro continuo de energía para incrementar la velocidad del fluido dentro de la bomba a valores mayores de los que existen en la succión, de manera que dentro de la bomba se produce un incremento en la presión.

¹ (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas., 2007, pág. 1)

² (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas., 2007, pág. 1)

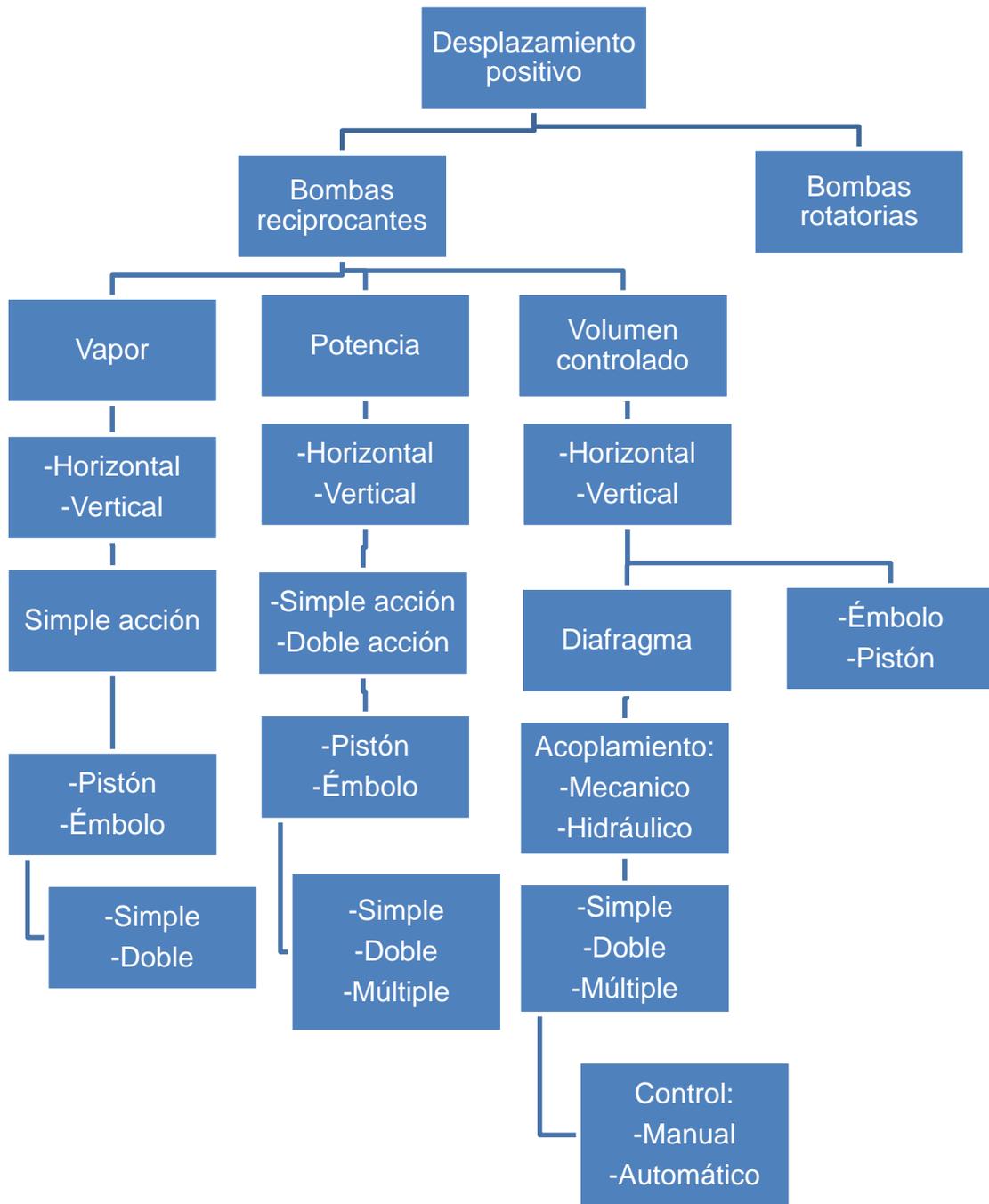


Figura 2-1. Diagrama de bombas de desplazamiento positivo (1)³

³ (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas., 2007, pág. 2)

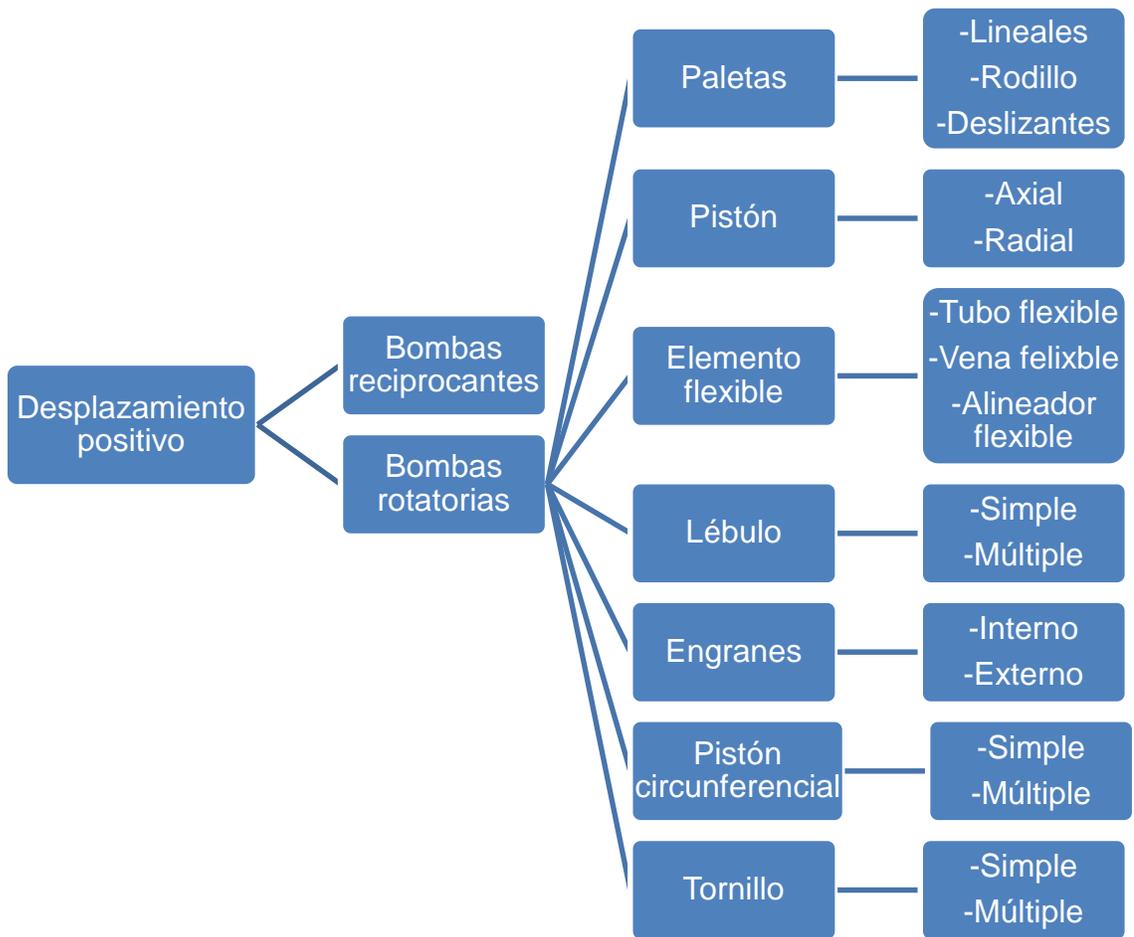


Figura 2-2. Diagrama de bombas de desplazamiento positivo (2)⁴

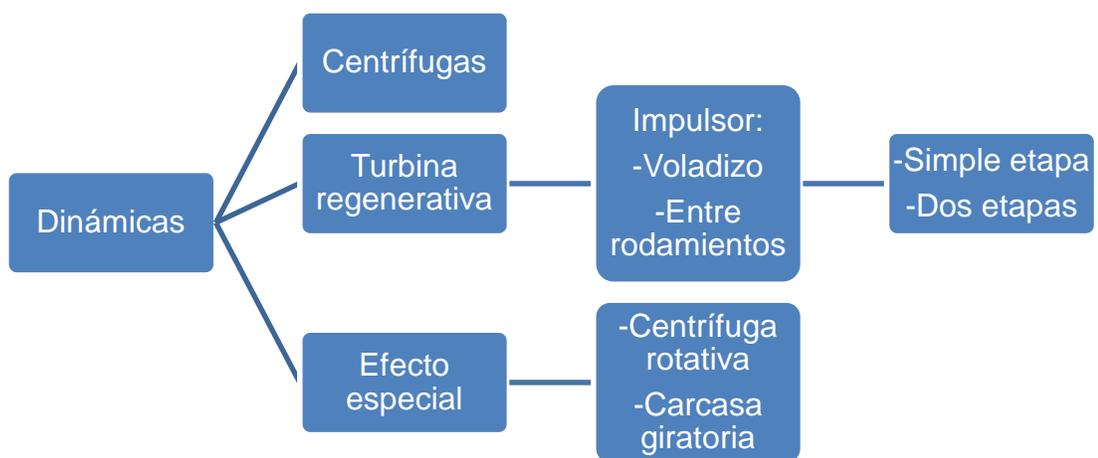


Figura 2-3. Diagrama de bombas dinámicas (1)⁵

⁴ (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas., 2007, pág. 2)

⁵ (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas., 2007, pág. 2)

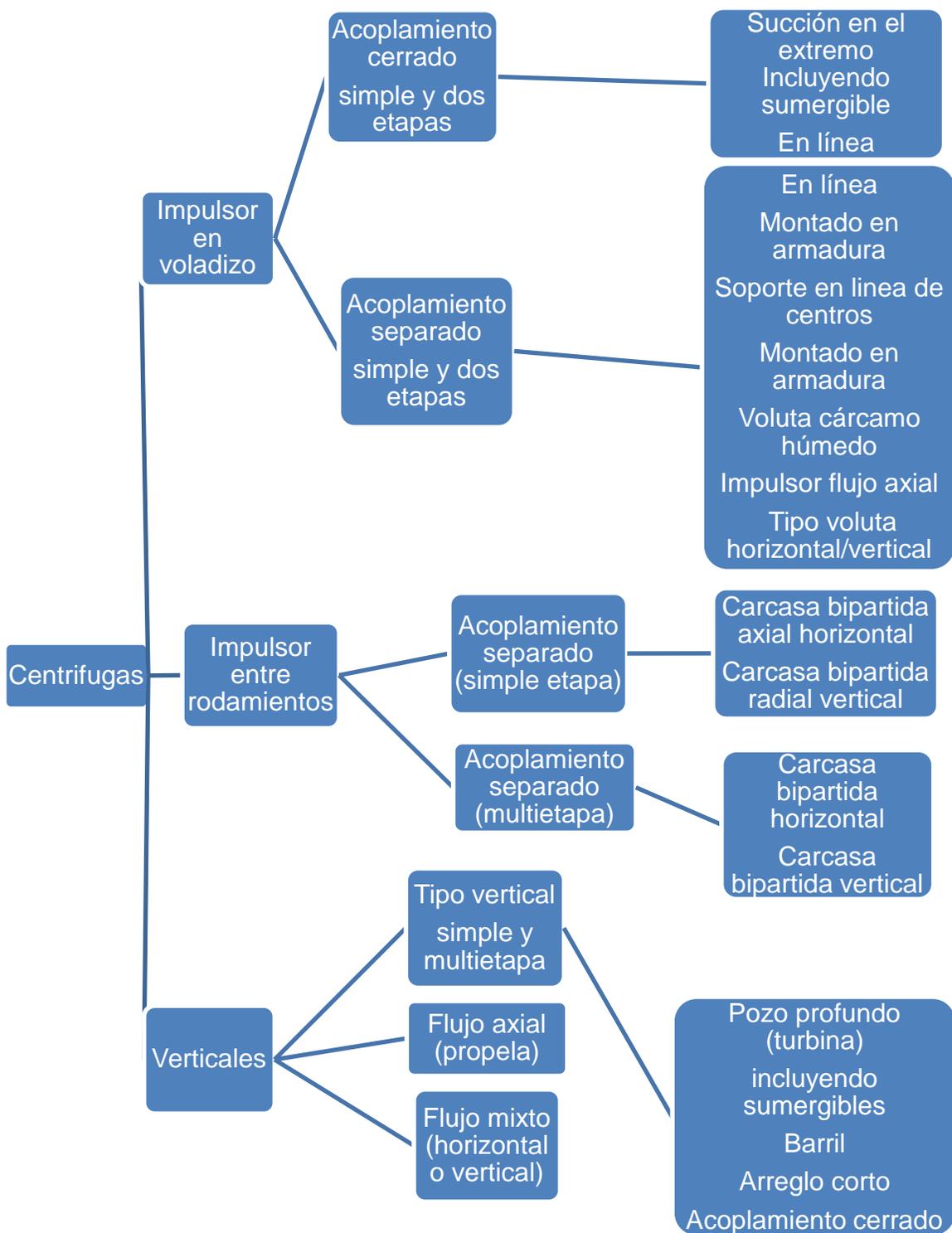


Figura 2-4. Diagrama de bombas dinámicas (centrífugas)⁶

⁶ (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas., 2007, pág. 2)

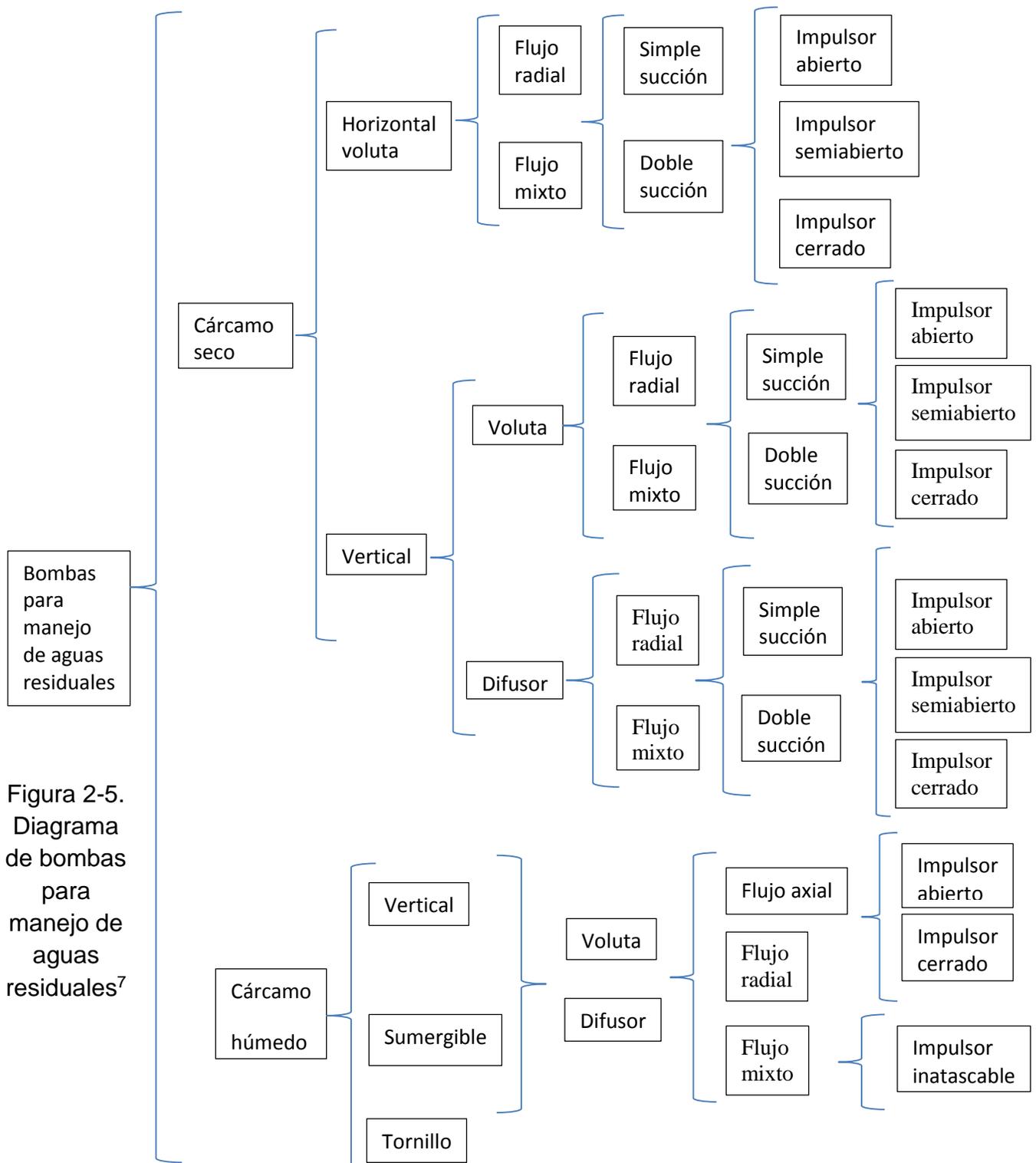


Figura 2-5. Diagrama de bombas para manejo de aguas residuales⁷

⁷ (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas., 2007, pág. 3)

2.1.3. Clasificación de bombas centrífugas

Los equipos de bombeo centrífugo se clasifican de acuerdo a la trayectoria del fluido en el interior del impulsor en flujo radial, axial o mixto⁸.

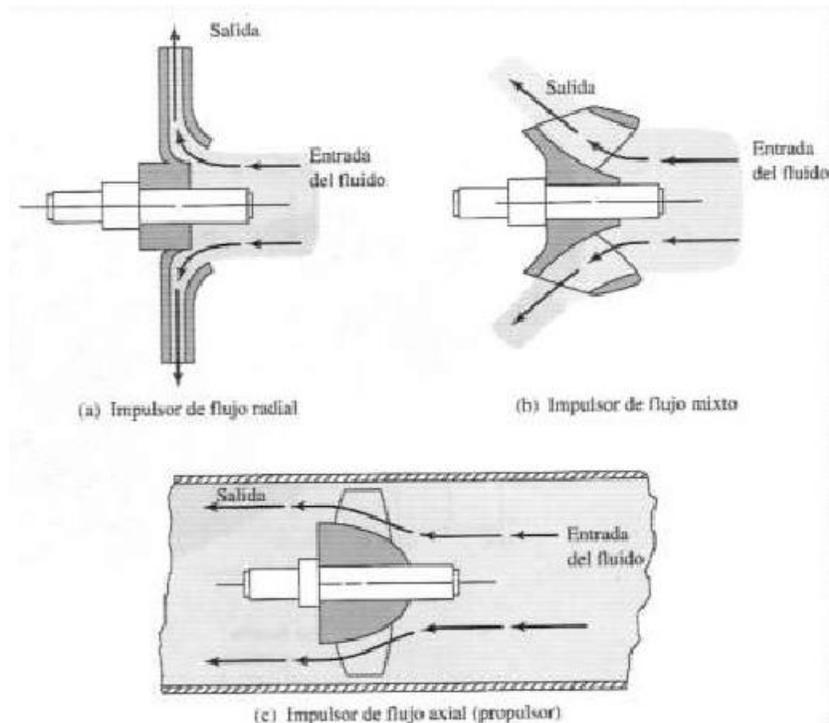


Figura 2-6. Clasificación de bombas centrífugas

a) Flujo radial:

Se puede presentar tanto en equipos de bombeo horizontales como verticales. La trayectoria del fluido inicia en un plano paralelo al eje de giro del impulsor de la bomba y termina en un plano perpendicular a éste.

b) Flujo mixto:

En este tipo de flujo se presenta una trayectoria del fluido dentro del impulsor en dirección axial, radial y tangencial al eje de giro del impulsor de la bomba, desarrollando parte de su carga por fuerza centrífuga y parte por el impulso de los álabes.

c) Flujo axial:

Usualmente se presenta en bombas verticales de un solo paso, donde elevan su carga por acción de un impulso o elevación de los alabes sobre el fluido. La

⁸ (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas., 2007, pág. 3)

trayectoria del fluido dentro del impulsor es en forma axial y alrededor del eje de giro del impulsor del equipo, sin tener cambios de dirección.

2.1.4. Tipos de bombas centrífugas

Existen varios tipos de bombas centrífugas con distintas adecuaciones que servirán para un tipo de servicio distinto, depende del servicio que se busque brindar el equipo que será la mejor opción para elegir, entre algunos equipos se encuentran los siguientes:

a) Bombas verticales:

Es una bomba para servicio en pozos o cárcamos, donde el nivel del líquido sobrepasa la altura de succión de las bombas horizontales. Por lo general, se diseñan para ser lubricadas por aceite o autolubricadas por el fluido bombeado.

b) Bombas con impulsor en voladizo:

Es una bomba en la cual el impulsor se monta en el extremo de la flecha, lo cual permite la transmisión de una fuerza y un momento sobre los rodamientos de la bomba.

c) Bombas con impulsor entre rodamientos:

Es una bomba en la cual los rodamientos se sitúan en los extremos, soportando la flecha con el impulsor o impulsores, esto dependerá del número de pasos con los que cuente la bomba⁹.

Debemos de entender que toda bomba centrífuga basa su funcionamiento en el aprovechamiento de la fuerza centrífuga suministrada al fluido por el impulsor en forma de velocidad, la cual a su vez se convierte en presión mediante los álabes que rodean al impulsor y por los cuales se impulsa el líquido.



Figura 2-7. Bomba instalada en la planta de bombeo

⁹ (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas., 2007, pág. 4)

2.1.5. Carga de bombeo

Se define a la carga de bombeo como la energía requerida para impulsar el líquido desde el punto de succión hasta el punto de descarga del sistema. Para ello, debe de vencer la diferencia de altura existente en el sistema así como la resistencia que existe dentro de este por las tuberías y los accesorios.

2.1.6. Carga dinámica total (CDT)

La carga dinámica total es la suma de todas las resistencias que se presentan en el sistema. Estas pérdidas son causadas por la carga estática total, por la fricción en el sistema de tuberías existentes entre la succión y la descarga y a la carga existente debida a la velocidad¹⁰.

$$CDT = H_e + H_f + H_v \quad (2-1)$$

Para este cálculo, se hace uso de la ecuación de balance de energía con la cual podemos obtener la carga dinámica total del sistema, esta ecuación se define como:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_s + CDT - H_{f\ 1-2} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_d \quad (2-2)$$

Donde:

p1 y p2: Presión sobre la superficie del líquido en los puntos 1 y 2

v1 y v2: Velocidad del fluido en los puntos 1 y 2

hs y hd: Altura de succión y descarga

CDT: Carga dinámica total de la bomba para conducir el líquido del punto 1 al punto 2

Hf 1-2: Pérdidas totales de carga presentes en la tubería desde la succión hasta la descarga

Y: Densidad relativa del fluido a la temperatura de bombeo

g: Aceleración gravitacional

De la ecuación de Energía, tenemos que la ecuación para el cálculo de la CDT se define como:

$$CDT = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (h_d - h_s) + H_{f\ 1-2} \quad (2-3)$$

¹⁰ (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas., 2007, pág. 5)

En sistemas donde la presión en el punto 1 es igual a la presión en el punto 2 y para fines prácticos donde se considera la velocidad de succión despreciable¹¹, la ecuación se reescribe como:

Para sistemas con carga de succión:

$$CDT = \frac{v_2^2}{2g} + (hd - hs) + H_{f_{1-2}} \quad (2-4)$$

Para sistemas con altura de succión:

$$CDT = \frac{v_2^2}{2g} + (hd + hs) + H_{f_{1-2}} \quad (2-5)$$

2.1.7. Pérdidas de carga en tuberías

2.1.7.1. Pérdidas primarias

Las pérdidas primarias ocurren por la fricción que se genera entre el fluido y la pared de la tubería por la cual circula. Para determinar este tipo de pérdidas se deben de considerar el tipo de material y el acabado interno de la tubería así como el régimen de flujo del líquido dentro de la tubería.

Para determinar el régimen de flujo se debe de calcular el número de Reynolds, el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu_c} \quad (2-6)$$

Donde:

v: Velocidad promedio del fluido en la tubería

D: Diámetro interno de la tubería

ρ : Densidad del fluido

μ : Viscosidad dinámica

ν_c : Viscosidad cinemática

Después de calcular el número de Reynolds, se establece el régimen de flujo mediante la siguiente clasificación:

¹¹ (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas., 2007, págs. 6-7)

Tabla 2-1. Régimen de flujo

Régimen laminar	$Re < 2000$
Zona de transición	$2000 < Re < 4000$
Régimen turbulento	$4000 < Re$

Dentro de estos cálculos también es necesario conocer la rugosidad absoluta debida al material de la tubería y su acabado interno así como el diámetro interno, pues con esta información se realiza el cálculo de la rugosidad relativa mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon}{D} \quad (2-7)$$

Donde:

ε : Rugosidad absoluta [mm]

Una vez conocidos el número de Reynolds y la rugosidad relativa, es posible determinar el coeficiente de fricción en el diagrama de Moody (Figura 2-8).

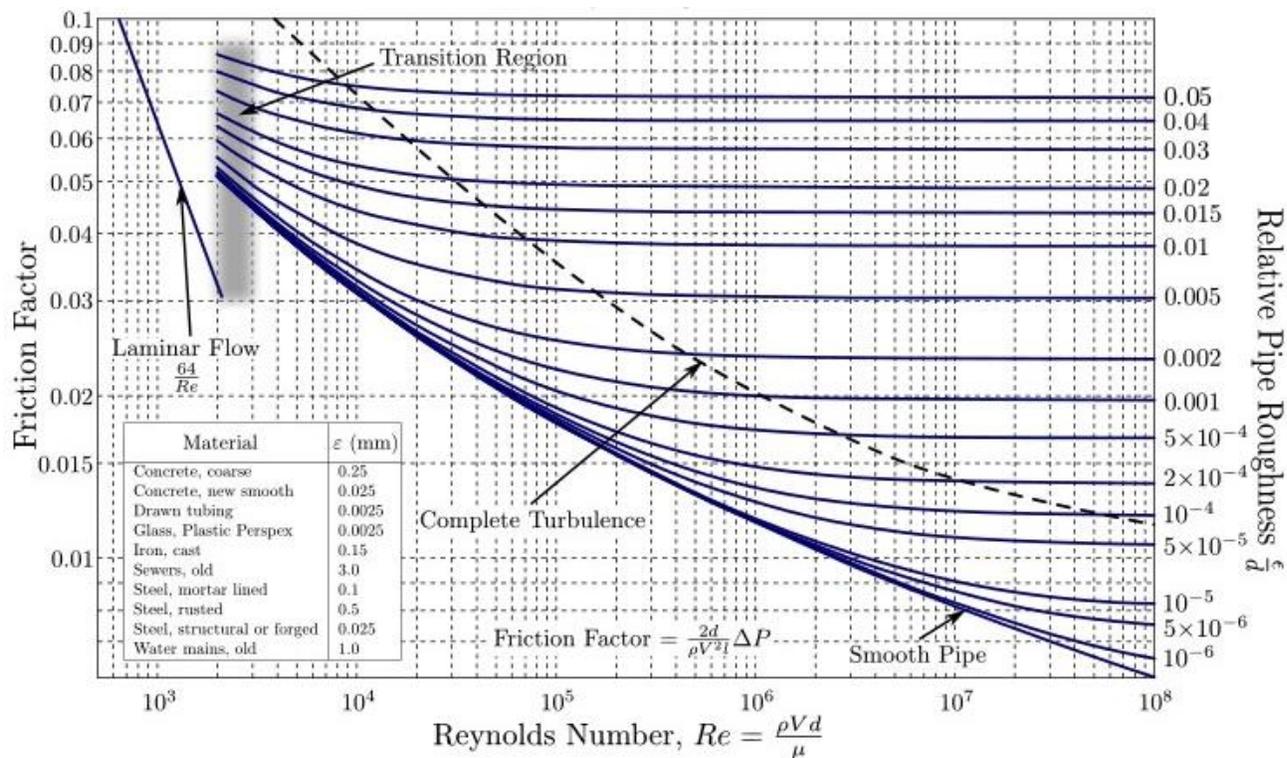


Figura 2-8. Diagrama de Moody

Otra forma de calcular el coeficiente de fricción de forma explícita y con un margen de error mínimo es mediante la ecuación de Swamee-Jaen, esta ecuación se define como:

$$f = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{3.74}{Re^{0.9}} \right) \right)^2} \quad (2-8)$$

Conociendo el coeficiente de fricción es posible calcular las pérdidas primarias a través de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (2-9)$$

donde:

hf: Pérdida de carga debido a la fricción por tramo recto de tubería

f: Coeficiente de fricción

L: Longitud de la tubería con el mismo diámetro

v: Velocidad promedio del líquido

Nota: En caso de que existiesen variaciones en diámetros de tubería, se debe de hacer un cálculo seccionado de las pérdidas debidas a la fricción en cada tramo.

2.1.7.2. Pérdidas secundarias

Este tipo de pérdidas es causado directamente por la resistencia que se presenta al flujo del fluido por parte de los accesorios presentes en el sistema de tuberías. Entre los tipos de accesorios podemos encontrar codos, tubos U, expansiones, reducciones, válvulas, etc.

Para calcular las pérdidas por accesorios, se debe considerar una pérdida de carga por cada punto donde se encuentre un accesorio, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$h_m = \sum K * \frac{v^2}{2g} = \sum K * \frac{8 * Q^2}{D^4 * \pi^2 * g} \quad (2-10)$$

donde:

hm: Pérdida de carga por accesorio

K: Coeficiente de resistencia del accesorio

El coeficiente de resistencia del accesorio depende de su geometría y del coeficiente de fricción. Entonces, para calcular la pérdida total por accesorios se debe evaluar cada punto donde se ubique un accesorio de forma individual mediante valores de coeficientes de resistencia definidos en tablas (Anexo. 3)

2.1.8. Potencia hidráulica

La potencia hidráulica se define como la energía por unidad de tiempo que obtiene el líquido al pasar por el impulsor de la bomba. Ésta se calcula con la siguiente ecuación:

$$Pot_H = Q H \rho g \quad (2-11)$$

Donde:

PotH: Potencia hidráulica [W]

Q: Gasto [m³/s]

H: Carga [m]

2.1.9. Potencia al freno (Brake Horsepower)

También conocida como potencia de entrada, se define como la potencia requerida en la flecha que conecta a la bomba con el accionador (motor). Es calculada de la siguiente forma:

$$BHP = \frac{Q H \rho g}{\eta_b} = \frac{Pot_H}{\eta_b} \quad (2-12)$$

La potencia al freno siempre es mayor que la potencia hidráulica, esto debido a las pérdidas que existen en la bomba (ya sean mecánicas o hidráulicas), por lo que la eficiencia de la bomba es la relación entre la potencia hidráulica y la potencia al freno, esto se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_b = \frac{Pot_H}{BHP} \quad (2-13)$$

2.1.10. Curva del sistema

Para cualquier estudio hidráulico de un sistema de bombeo es necesario construir una curva que describa el comportamiento hidráulico del sistema, para ello se hace una gráfica de carga-gasto en la cual se puedan reflejar las pérdidas totales debidas a las cargas.

Esta curva también será útil dentro de un estudio hidráulico de un sistema pues con ésta podemos identificar el rango de operación de una bomba o conjunto de bombas dentro del sistema, así como el punto de máxima eficiencia. También es útil para cuantificar pérdidas dentro del sistema en un momento dado, así como para conocer la carga dinámica total con diferentes tipos de tuberías.

La curva del sistema se traza al obtener una serie de puntos de carga en función del gasto, por lo que se tendrá un valor de carga para cada valor de gasto que sea asignado.

La forma de obtener puntos de la curva del sistema es mediante el cálculo de la demanda de carga del sistema para diferentes valores de gasto dentro de un rango definido. Los puntos de la curva se determinan por medio de la ecuación de la energía, utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach y la ecuación para pérdidas secundarias en función del gasto:

$$H_f = \frac{8 f L Q^2}{D^5 \pi^2 g} + \sum K * \frac{8 * Q^2}{D^4 * \pi^2 * g} \quad (2-14)$$

Como se puede observar, al variar el gasto dentro del sistema la velocidad del fluido también cambia, esto provoca pérdidas en la tubería dentro de un rango que varía desde el gasto mínimo de la curva hasta el gasto máximo de diseño, esto puede expresarse en función del gasto a través de la siguiente ecuación

$$H_f = Q^2 \left[\frac{8 f L}{D^5 \pi^2 g} + \sum K * \frac{8}{D^4 * \pi^2 * g} \right] \quad (2-15)$$

En general, se puede observar que el término entre corchetes puede variar en función del gasto al contener a f , sin embargo, esta variación es pequeña por lo que puede considerarse constante. El efecto que puede cambiar drásticamente el término mencionado es el valor de K asociado a válvula(s) de control.

$$C1 = \frac{8 f L}{D^5 \pi^2 g} + \sum K * \frac{8}{D^4 * \pi^2 * g} \quad (2-16)$$

$$C2 = \frac{8 f L}{D^5 \pi^2 g} + \sum K * \frac{8}{D^4 * \pi^2 * g} \quad (2-17)$$

$$C1 = C2 \quad (2-18)$$

Asumiendo estos valores como constantes, la ecuación queda directamente en función del gasto, por lo que a cada valor en el rango de operación le corresponderá un valor de carga distinto. Por lo que para cada punto conocido (n) y desconocido (m), se tiene que:

$$H_{f n} = C1 Q_n^2 \quad (2-19)$$

$$H_{f m} = C1 Q_m^2 \quad (2-20)$$

De las cuales, al relacionar entre si nos dan como resultado la siguiente ecuación:

$$\frac{H_{f m}}{H_{f n}} = \left(\frac{Q_m}{Q_n} \right)^2 \quad (2-21)$$

Como se puede observar, la representación gráfica que se tendrá de una curva del sistema tendrá un comportamiento correspondiente a una parábola. Sin embargo esto solamente es válido para sistemas de fricción pura, en el caso general, se deberá sumar la carga estática causada por el incremento de presión y el cambio de nivel entre la succión y descarga:

$$H_b = H_f + H_{estática} \quad (2-22)$$

Para el caso particular del sistema analizado, la diferencia de presión es $\Delta P = 0$ y la diferencia de altura es la variable que hace cambiar la carga estática, lo que hará que la curva del sistema cambie conforme se vacíe el cárcamo. En la figura 2-9 se muestra el comportamiento de la curva del sistema del cárcamo de bombeo la cual corresponde a un sistema dinámico con un nivel estático variable.

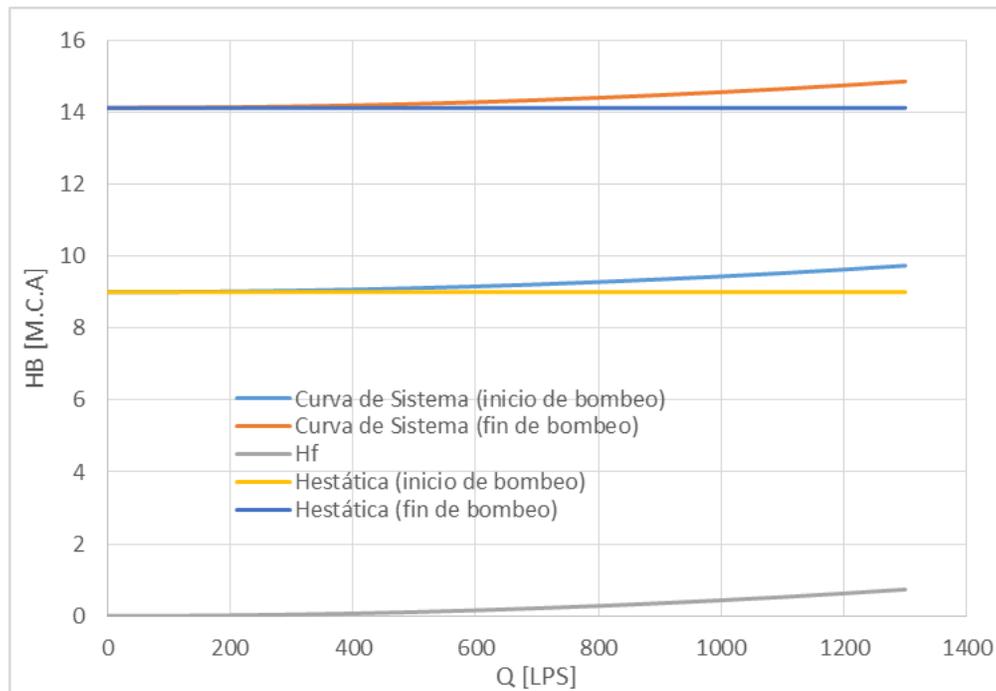


Figura 2-9. Gráfica de curvas del sistema al inicio y al finalizar el vaciado del cárcamo

2.1.11. Curvas características de las bombas

Se conoce como curva característica de la bomba a aquella curva que define el comportamiento hidráulico de una bomba de cierta capacidad y de características geométricas definidas. Este comportamiento hidráulico se define a partir del gasto que la bomba puede suministrar a una cierta carga, de igual manera las curvas características nos brindan información sobre la potencia, la eficiencia y el NPSH como función del gasto, las cuales pueden variar dependiendo del fluido que sea bombeado.

En la Figura 2-10 podemos observar como la potencia, la eficiencia y el NPSH cambian al modificar el gasto de la bomba lo cual es importante pues al correlacionar estas variables podremos identificar el BEP (Best Efficient Point) en el cual el equipo podrá trabajar de la mejor manera con respecto a las características con las que fue diseñado.

En sistemas donde varía la carga estática, como en el caso de estudio, se podrá alcanzar el BEP en un punto pero no podrá mantenerse debido a que el mismo sistema irá cambiando la carga conforme se vacíe el cárcamo.

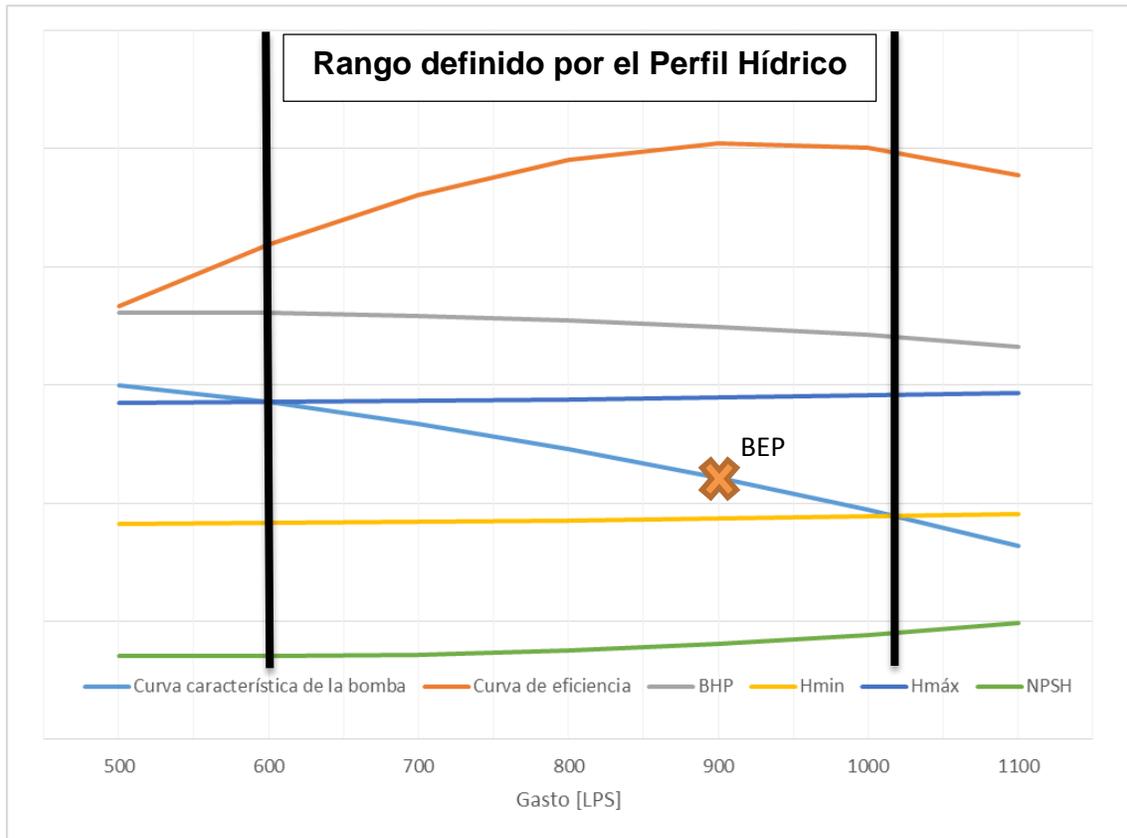


Figura 2-10. Curvas en función del gasto

2.1.12. Punto de operación

Se define como el punto de intersección entre la curva característica de la bomba y la curva del sistema.

El punto de operación de un sistema de bombeo debe encontrarse en el punto máximo de eficiencia o cercano a este punto, esto se debe a que la potencia y la eficiencia son inversamente proporcionales, por lo que en cuanto más cercano se encuentre la operación a su punto óptimo, el rendimiento será mejor, lo que se traduce en un buen aprovechamiento de la energía.

Cuando la carga cambia, como en el caso de estudio, el punto de operación va a cambiar con respecto al tiempo debido a que el cárcamo se irá vaciando y la curva del sistema cambiará de posición, esto nos da como resultado un rango de operación del sistema de bombeo como se refleja en la Figura 2-11.

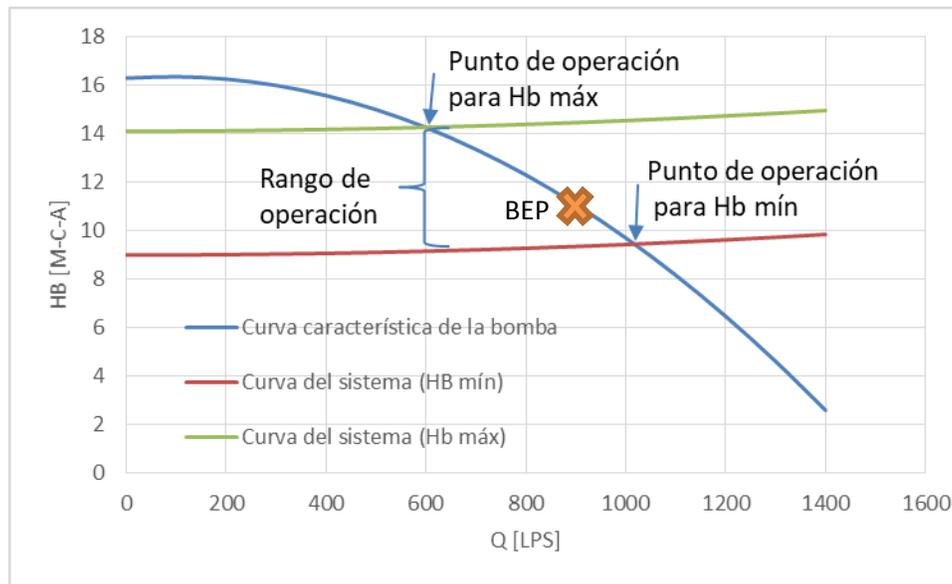


Figura 2-11. Rango de operación del sistema de bombeo

2.1.13. Cavitación

Es un fenómeno físico que se presenta a la succión de una bomba cuando ésta opera cerca del punto de presión de vapor del líquido bombeado, se forman y después colapsan burbujas de vapor dentro de los impulsores dañando al equipo de bombeo al erosionar los elementos que conforman a la bomba. El fabricante debe probar sus bombas para determinar donde ocurre la cavitación. El parámetro que define las características descritas se denomina NPSH y es el requerido por el fabricante. Este parámetro que está directamente relacionado a una bomba en particular, se puede utilizar desde el punto de vista de un sistema, mediante el NPSH disponible. A diferencia del primero, este involucra las características físicas de la succión, del fluido a manejar y de las condiciones ambientales, de manera que se puede lograr en todos los casos que las bombas no caviten, al hacer la NPSH disponible mayor a la requerida.

La cavitación puede evitarse siempre que se cumpla con la desigualdad:

$$NPSH_d > NPSH_r \quad (2-23)$$

2.1.14. Bombeo en serie

Este tipo de arreglo se utiliza en instalaciones donde se requiere de un incremento en la carga a partir del uso de dos o más bombas de la misma capacidad conectadas entre sí. En una conexión en serie, el gasto que proporcionan las bombas es el mismo sin importar cuantas bombas sean conectadas, en este arreglo se busca aumentar únicamente la carga la cual es igual a la suma de las cargas individuales de cada equipo.

Para ello, las siguientes ecuaciones describen el comportamiento de un arreglo en serie:

$$Q_{sistema} = Q_{bomba1} = Q_{bomba2} = \dots = Q_{bomba n} \quad (2-24)$$

$$H_{sistema} = H_{bomba1} + H_{bomba2} + \dots + H_{bomba n} \quad (2-25)$$

$$BHP_{Sistema} = BHP1 + BHP2 + \dots + BHPn \quad (2-26)$$

$$\eta_{Sistema} = \frac{H1 + H2 + \dots + Hn}{\frac{H1}{\eta1} + \frac{H2}{\eta2} + \dots + \frac{Hn}{\eta_n}} \quad (2-27)$$

2.1.15. Bombeo en paralelo

Este tipo de arreglo se utiliza cuando los requerimientos en el bombeo varían o cuando la descarga de dos o más bombas están conectadas a una misma tubería. En caso de no descargar a una tubería sino a un tanque superior, el arreglo se conoce como paralelo virtual.

En este diseño, la curva de comportamiento se obtiene de la suma del gasto de cada bomba para las mismas condiciones de carga. De tal manera que las ecuaciones que describen el comportamiento de un bombeo en paralelo son:

$$Q_{sistema} = Q_{bomba1} + Q_{bomba2} + \dots + Q_{bomba n} \quad (2-28)$$

$$H_{sistema} = H_{bomba1} = H_{bomba2} = \dots = H_{bomba n} \quad (2-29)$$

$$BHP_{Sistema} = BHP1 + BHP2 + \dots + BHPn \quad (2-30)$$

$$\eta_{Sistema} = \frac{Q1 + Q2 + \dots + Qn}{\frac{Q1}{\eta1} + \frac{Q2}{\eta2} + \dots + \frac{Qn}{\eta_n}} \quad (2-31)$$

Para el caso en el cual se pongan en operación dos o más bombas con las mismas características operando en paralelo, la siguiente gráfica muestra el comportamiento típico:

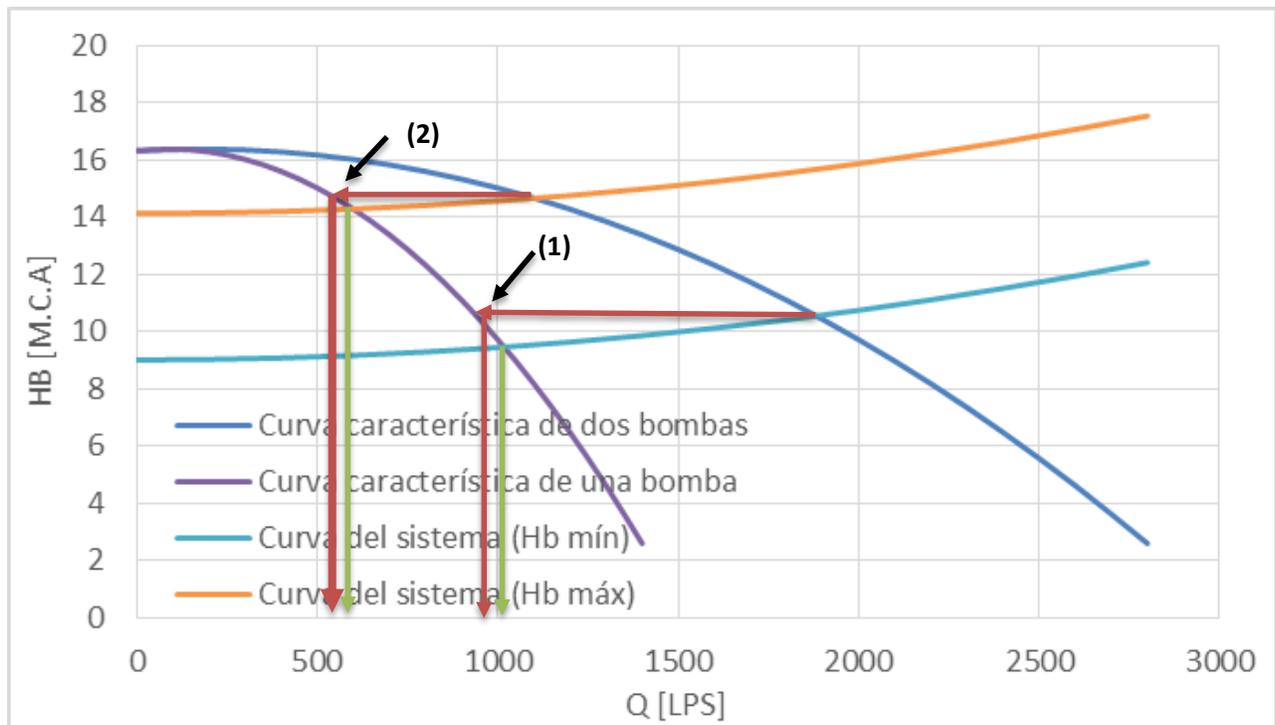


Figura 2-12. Curvas características para una y dos bombas

Sin importar el número de bombas que se conecten en paralelo, mientras éstas sean de la misma capacidad para los mismos puntos de gasto contra carga, las curvas virtuales saldrán de incrementar el gasto según el número de equipos conectados.

Cabe resaltar que al conectar más bombas en paralelo no quiere decir que el gasto aumente utilizando como factor multiplicativo el número de equipos en funcionamiento. Para conocer el gasto real se deberá trazar una línea horizontal (misma carga) que intersecte la curva de una bomba (i.e. Inciso 1 y 2 de la Figura 2-12) por lo que al conectar dos o más equipos estos bombearán un poco menos debido a las características dadas por la curva del sistema.

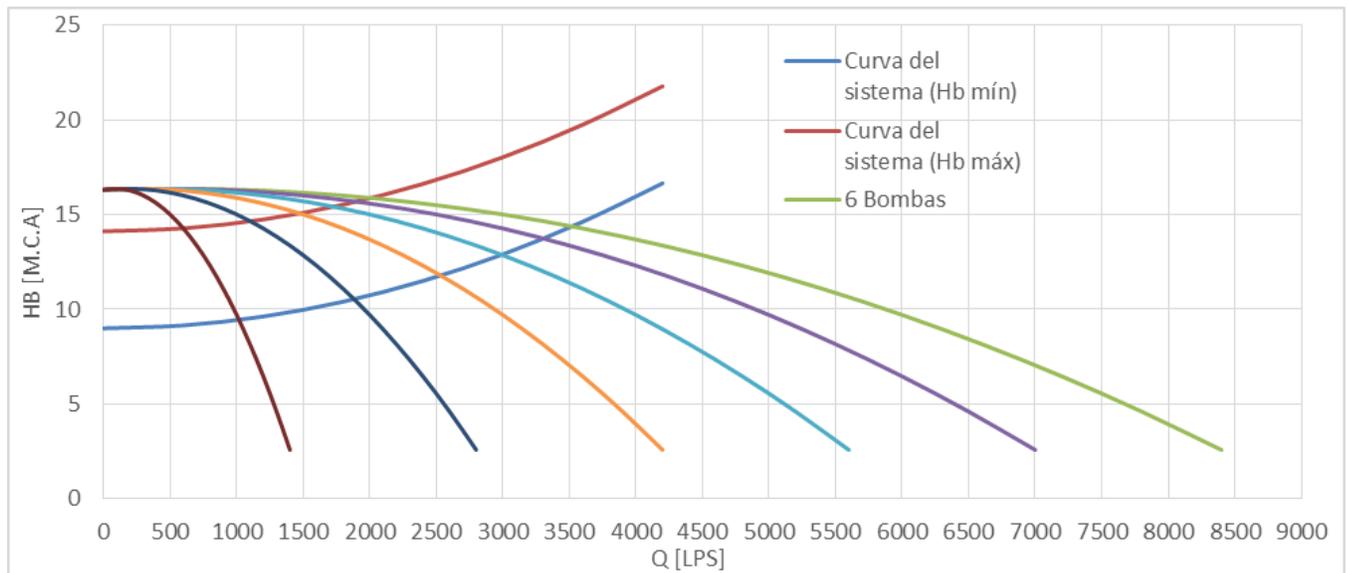


Figura 2-13. Curvas características para una o más bombas encendidas

2.1.16. Leyes de afinidad

Se le conoce como leyes de afinidad a relaciones matemáticas que permiten predecir el comportamiento de una bomba en función de un diámetro y velocidad del impulsor conocidos, éstas quedan definidas en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Leyes de Afinidad en función del diámetro y la velocidad del impulsor

Leyes de Afinidad	
Cambio de velocidad	Cambio de diámetro
$\frac{Q1}{Q2} = \frac{n1}{n2}$	$\frac{Q1}{Q2} = \left(\frac{D1}{D2}\right)^3$
$\frac{H1}{H2} = \left(\frac{n1}{n2}\right)^2$	$\frac{H1}{H2} = \left(\frac{D1}{D2}\right)^2$
$\frac{w1}{w2} = \left(\frac{n1}{n2}\right)^3$	$\frac{w1}{w2} = \left(\frac{D1}{D2}\right)^5$

En donde:

Q: Gasto

H: Carga de bombeo

W: Potencia

n: Velocidad de la bomba

Subíndice 1. Condiciones iniciales conocidas / Subíndice 2. Condiciones variables por conocer.

Las leyes de afinidad funcionan en casos en los cuales se presenten pequeños cambios en el diámetro del impulsor, pero pierden confiabilidad con variaciones mayores al 10%, por lo que en esos casos es recomendable buscar una curva característica de la bomba para ese diámetro de impulsor.

2.2. Conceptos eléctricos

2.2.1. Motores eléctricos

Un motor eléctrico es un dispositivo que permite la transformación de energía eléctrica en energía mecánica mediante la rotación de un campo magnético inducido alrededor de un embobinado.

2.2.2. Diferencia de potencial

También conocida como tensión o voltaje, se define como el potencial eléctrico de un cuerpo. La diferencia de potencial entre dos puntos es la responsable de producir la circulación de una corriente eléctrica cuando existe un conductor que los vincula. Utiliza como unidad de medida el Volt [V]

2.2.3. Intensidad de corriente

La intensidad de corriente eléctrica se define como el número de cargas igual a 1 Coulomb que pasan por un punto definido en el conductor en un segundo. La unidad de medida es el Amper [A].

$$1 [A] = 1 [C/s]$$

2.2.4. Factor de potencia

Defasamiento existente entre la diferencia de potencial y la intensidad de corriente en un circuito de corriente alterna. Representa el factor de utilización de la potencia eléctrica entre la potencia aparente o de placa con la potencia real.

$$F.P. = \frac{P}{S} = \cos \varphi = \cos \frac{V}{I}$$

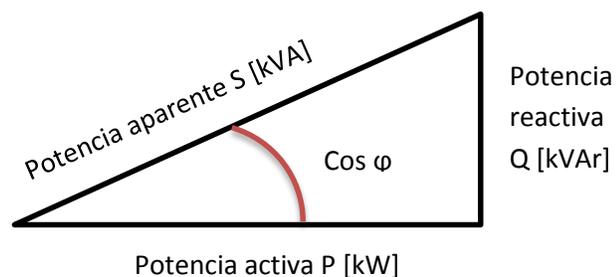


Figura 2-14. Triángulo de potencias

2.2.5. Potencia eléctrica

Se le conoce como la capacidad de realizar trabajo o transferencia de energía realizada por unidad de tiempo, tiene como unidad de medida el Watt [W].

2.2.6. Consumo de energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica se puede definir como la potencia eléctrica utilizada por una instalación eléctrica durante un período determinado de tiempo. Generalmente se utiliza como unidad de medida el [kWh].

2.2.7. Demanda eléctrica

Se le conoce como demanda eléctrica al requerimiento instantáneo a un sistema eléctrico de potencia. La demanda se mide en unidades de potencia [W], aunque dependiendo de la demanda se pueden utilizar sus prefijos kilo-[kW] o mega-[MW].

Capítulo III. Análisis del sistema de bombeo

El sistema de la planta de bombeo contempla un arreglo de 5+1 bombas sumergibles conectadas en un arreglo paralelo “virtual”. Este arreglo de bombas es utilizado para obtener un gasto de vaciado mayor en caso de ser necesario pues como se describió en el capítulo anterior, al encender más equipos el gasto va a aumentar mientras que la carga seguirá siendo la misma. En el caso particular de la temporada seca, solamente se enciende una bomba por cada vez que se hace una descarga del cárcamo.

Con la operación actual, la planta de bombeo realiza de forma habitual 6 descargas diarias por 7 periodos de llenado del cárcamo, según los registros de la bitácora que tienen en las instalaciones. Esto limitándose a la temporada seca del año donde el gasto de llenado del cárcamo es más estable.

En la Tabla 3-1 podemos ver un ejemplo del programa de vaciado diario.

Tabla 3-1. Programa actual de vaciado diario de la planta de bombeo

Número de descarga	Bomba utilizada
1	Bomba 1
2	Bomba 2
3	Bomba 3
4	Bomba 4
5	Bomba 5
6	Bomba 6

Utilizar una bomba diferente para cada descarga evita un desgaste mayor para un equipo en particular haciendo que las bombas se desgasten de manera similar, lo cual permite tener periodos de mantenimiento mejor programados.

Para el caso en el cual se requiera ocupar dos equipos por descarga, también se hará un programa de vaciado con una combinación de equipos que permita que el desgaste sea similar en cada uno.

3.1. Cálculo hidráulico de las bombas

Se cuenta con seis equipos de bombeo, estos son iguales y cuentan con las siguientes características descritas en las tablas 3-2, 3-3 y 3-4 que aparecen a continuación:

Tabla 3-2. Datos de placa de los equipos de bombeo de la planta **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

DATOS DE PLACA DE LA BOMBA				
Marca	Indar Beasain (España)			
Modelo	BF-60-B2			
Carga (Hm)	14	m.c.a (mts. De columna de agua)		
Gasto (Q)	60000	l/m		
	1000	lps	1	m3/s
Número de pasos	1			
Diámetro de aspiración	600	mm	0.6	m
Diámetro de impulsión	600	mm	0.6	m

Tabla 3-3. Datos de placa de los motores de las bombas

DATOS DE PLACA DEL MOTOR		
Modelo	MF-355-12/185	
Potencia	185	kW
	250	HP
Voltaje	460	V
n	585	rpm
Intensidad	360	A
Frecuencia	60	Hz
Sumergencia máx.	40	m

Tabla 3-4. Datos de las dimensiones de la planta de bombeo

DATOS DE DIMENSIONES DE LA PLANTA		
Diámetro del cárcamo	14	m
Altura del Cárcamo	11.67	m
Diámetro tubería de descarga	1.27	m
Altura de tubería de descarga	5	m
Altura total	16.67	m

3.1.1. Curvas características de las bombas

Cuando se cuenta con un arreglo en paralelo, las bombas trabajan en forma conjunta otorgando un gasto que puede variar dependiendo de las necesidades de bombeo de la

planta, cuanto más se requiera se puede poner en operación a más de un equipo para aumentar el gasto. Por otra parte, la carga hidráulica permanecerá constante en este tipo de arreglos.

Conociendo los equipos instalados en la planta de bombeo se debe proceder a la construcción de las curvas características de cada bomba y de las bombas operando en conjunto, para conocer el comportamiento hidráulico.

Para determinar con precisión la interacción entre el sistema de bombeo y la bomba o bombas es recomendable construir una gráfica que involucre tanto a las bombas, como al sistema, para ello se requieren las curvas características del fabricante. Las figura 3-1, 3-2 y 3-3 muestra las curvas de carga contra gasto, potencia al freno y NPSHr de las bombas del sistema, respectivamente

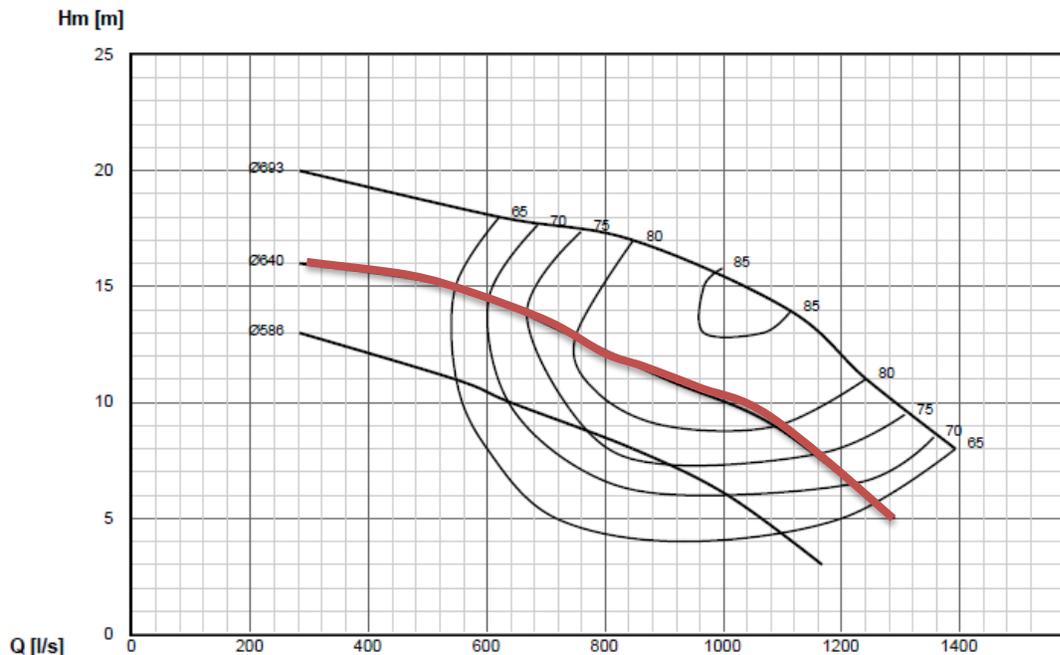


Figura 3-1. Curvas H-Q (Fuente: Catálogo de bombas Indar Beseain Spain 2011)

Seleccionando la curva correspondiente al diámetro de los equipos, se obtienen los puntos de gasto, carga hidráulica y eficiencia. Con estos puntos se genera una curva polinómica para obtener un ajuste en la carga hidráulica y otra para un ajuste en la eficiencia. Para cada ajuste, el polinomio expresado se obtuvo a partir de un programa de computadora.

La curva correspondiente al ajuste de la carga hidráulica es representada matemáticamente por el siguiente polinomio:

$$y = -8E-06x^2 + 0.0014x + 16.31$$

Para la curva correspondiente al ajuste de la eficiencia, la expresión matemática se representó mediante el siguiente polinomio:

$$y = -6.691919E-08x^3 + 3.474026E-05x^2 + 1.097276E-01x + 5.952381$$

Con esos polinomios, expresados en función del gasto, obtenemos los valores ajustados para cada punto. La Tabla 3-5 muestra los valores obtenidos con los polinomios de ajuste, así como los valores de potencia hidráulica y el BHP calculados mediante las fórmulas dadas en el Capítulo 2.

Tabla 3-5. Valores de carga y eficiencia ajustada

Q	Hm	η	Hm ajustada	η ajustada	Potencia Hidráulica		BHP	
					[kW]	[HP]	[kW]	[HP]
100	-	-	16.37	17.2	16.06	21.53	93.34	125.11
200	-	-	16.27	28.8	31.92	42.79	111.02	148.82
300	15.9	-	16.01	40.2	47.12	63.16	117.23	157.15
400	15.7	-	15.59	51.1	61.17	82.00	119.67	160.42
500	15.2	61	15.01	61.1	73.62	98.69	120.43	161.43
600	14.6	70	14.27	69.8	83.99	112.59	120.26	161.21
700	13.3	77	13.37	76.8	91.81	123.07	119.50	160.18
800	12.2	81.5	12.31	81.7	96.61	129.50	118.24	158.50
900	11	84.5	11.09	84.1	97.91	131.25	116.48	156.13
1000	10.1	82.5	9.71	83.5	95.25	127.69	114.08	152.92
1100	8.8	80	8.17	79.6	88.16	118.18	110.73	148.43
1200	7	72.5	6.47	72.0	76.16	102.10	105.76	141.77
1300	4.8	60	4.61	60.3	58.79	78.81	97.518	130.72

3.1.2. Potencia al freno

Al igual que con la curva característica de la bomba, al conocer el diámetro y la curva que le corresponde a la potencia al freno, se seleccionan valores de potencia para los mismos puntos de gasto seleccionados previamente con los cuales se conocerá la potencia desde la gráfica. Después se hace un ajuste a la curva con un polinomio se representa matemáticamente de la siguiente manera:

$$y = -5E-08 x^3 + 6E-05x^2 - 0.0054x + 112.44$$

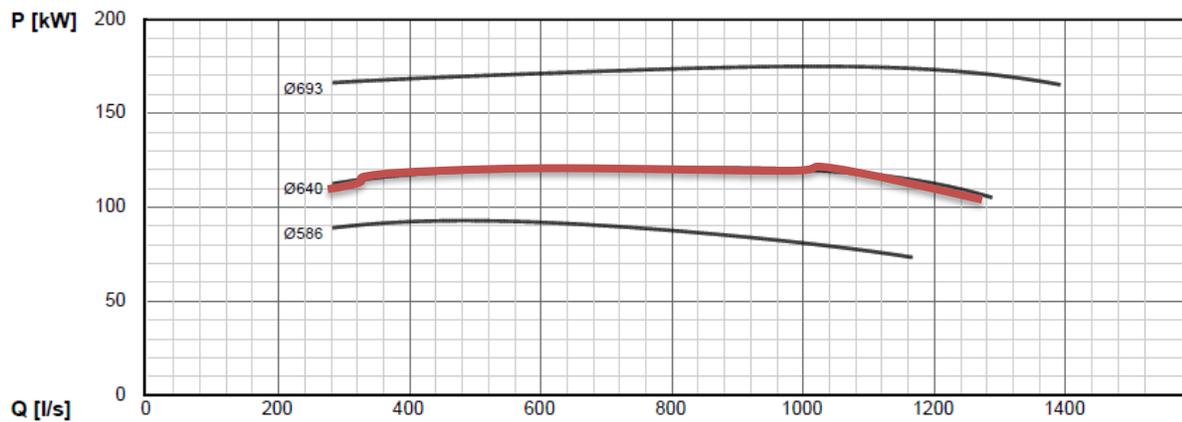


Figura 3-2. Potencia contra Gasto (Fuente: Catálogo de bombas Indar Beseain Spain 2011)

3.1.3. Net Positive Suction Head (NPSHr)

A partir de la gráfica de la bomba podemos conocer la NPSH requerida por el equipo de bombeo a distintos gastos, para ello seleccionamos varios puntos de gasto y los comparamos. Posteriormente se realiza un ajuste mediante el siguiente polinomio:

$$y = 5E-06x^2 - 0.0057x + 5.131$$

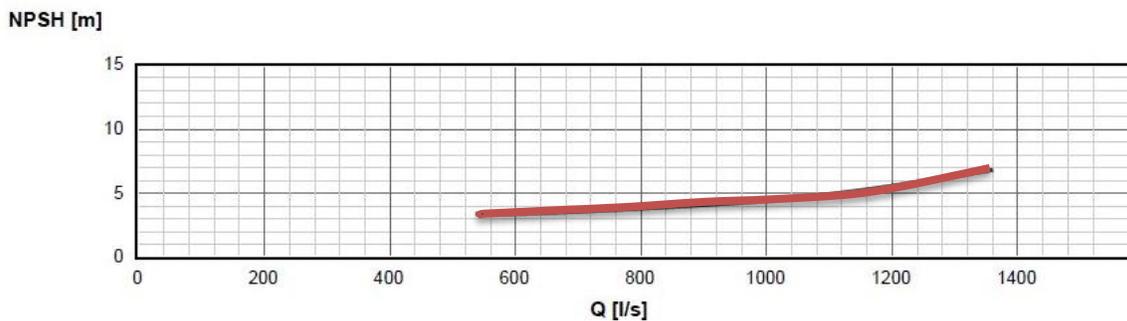


Figura 3-3. NPSHr contra gasto (Fuente: Catálogo de bombas Indar Beseain Spain 2011)

La tabla 3-6 muestra los resultados de los ajustes contrastándolos con los valores obtenidos de las gráficas de catálogo.

Tabla 3-6. Valores de potencia y NPSH ajustada

Q	P	P	NPSH	NPSH
l/s	kW	ajustada kW	m	ajustada m
100	-	112.45	-	4.611
200	-	113.36	-	4.191
300	113	114.87	-	3.871
400	118.5	116.68	-	3.651
500	120.5	118.49	-	3.531
600	121	120	3.5	3.511
700	121.5	120.91	3.8	3.591
800	121.5	120.92	3.9	3.771
900	121.5	119.73	4	4.051
1000	120.5	117.04	4.6	4.431
1100	119.5	112.55	5	4.911
1200	114	105.96	5.9	5.491
1300	105	96.97	6.3	6.171

3.2. Construcción de la curva del sistema

El sistema hidráulico de la planta de bombeo está diseñado con seis bombas conectadas en un arreglo paralelo “virtual”, esta característica nos permite calcular las pérdidas por equipo de forma individual debido a que el flujo de una bomba no afectará el de otra al momento de poner en marcha a más de una bomba por descarga.

El sistema de tuberías de cada bomba se conforma por un codo en la descarga, una ampliación, una tubería de descarga y una tubería U para la descarga en el tanque de vaciado el cual descarga por dos tuberías a un río que se encuentra a un costado de la planta de bombeo.

Por lo tanto, la construcción de la curva del sistema se hará considerando la suma de la carga estática más las pérdidas que existen dentro del sistema de tuberías. Esta curva se calcula con la siguiente ecuación:

$$H_b = \frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta Z + \text{Pérdidas por fricción} + \text{Pérdidas por accesorios} \quad (3-1)$$

Donde:

$\frac{\Delta P}{\gamma} = 0$; debido a que la diferencia de presión entre succión y descarga es cero

$$\text{Pérdidas por fricción} = h_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2 * g} = \frac{8 * f * L * Q^2}{D^5 * \pi^2 * g} \quad (3-2)$$

$$\text{Pérdidas por accesorios} = h_m = k * \frac{V^2}{2 * g} = k * \frac{8 * Q^2}{D^4 * \pi^2 * g} \quad (3-3)$$

Debido a que las pérdidas varían en función del gasto, éstas van a tener un incremento al aumentar el gasto en el sistema.

Los resultados de las pérdidas por fricción y por accesorios quedan reflejados en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Pérdidas por fricción y accesorios

Datos		Pérdidas					
Q	Hm	Fricción	Accesorios			Hf	
[l/s]	[m]	m	Codo	Ampliación	U	TOTAL	m
100	0	0.00090935	0.0010302	0.0005151	0.00206039	0.0036	0.0045
200	0	0.00335643	0.00412078	0.00206039	0.00824157	0.0144	0.0178
300	15.9	0.0072818	0.00927176	0.00463588	0.01854352	0.0325	0.0397
400	15.7	0.01267139	0.01648313	0.00824157	0.03296626	0.0577	0.0704
500	15.2	0.01951902	0.02575489	0.01287745	0.05150979	0.0901	0.1097
600	14.6	0.02782128	0.03708705	0.01854352	0.07417409	0.1298	0.1576
700	13.3	0.03757605	0.05047959	0.0252398	0.10095918	0.1767	0.2143
800	12.2	0.0487819	0.06593253	0.03296626	0.13186506	0.2308	0.2795
900	11	0.0614378	0.08344586	0.04172293	0.16689171	0.2921	0.3535
1000	10.1	0.07554296	0.10301957	0.05150979	0.20603915	0.3606	0.4361
1100	8.8	0.0910968	0.12465369	0.06232684	0.24930737	0.4363	0.5274
1200	7	0.10809883	0.14834819	0.07417409	0.29669638	0.5192	0.6273
1300	4.8	0.12654865	0.17410308	0.08705154	0.34820616	0.6094	0.7359

Una característica del sistema de bombeo analizado es que la curva del sistema no permanecerá en un punto pues depende del nivel del agua que en las condiciones de esta planta de bombeo no permanece estático, por lo que la diferencia de altura (ΔZ) será diferente conforme vaya vaciándose el cárcamo. Se toman como referencia los niveles para el inicio y finalización del bombeo, ambos definidos en el diseño de la planta de bombeo (Tabla 1-1) y la altura de la tubería de descarga (Tabla 3-4).

Por lo tanto, veremos reflejados dos rangos, los cuales se definen como:

$$Hb_{min} = \Delta Z_{inicio\ de\ bombeo} + Hf \quad (3-4)$$

$$Hb_{m\acute{a}x} = \Delta Z_{fin\ de\ bombeo} + Hf \quad (3-5)$$

La Figura 18 muestra las curvas del sistema al inicio y fin del bombeo:

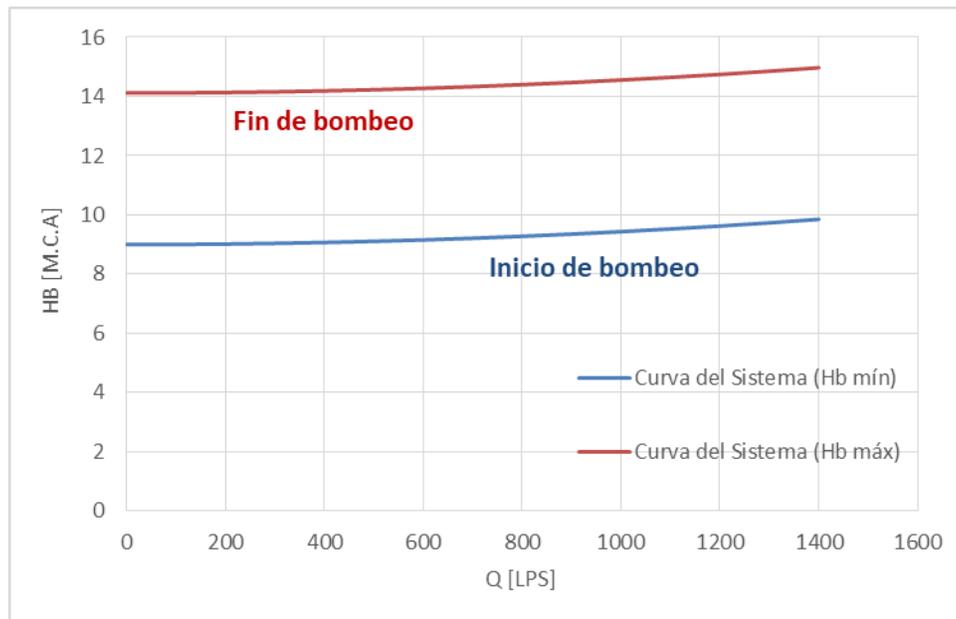


Figura 3-4. Curvas del sistema en función de la carga

3.3. Punto de operación

Una vez que se cuenta con la curva característica de la bomba (Figura 3-1) y la curva del sistema (Figura 3-4), si se grafican simultáneamente el cruce de ambas curvas da el punto de operación del sistema de bombeo.

Al encontrar el punto de operación, se busca que éste se aproxime en medida de lo posible al BEP para garantizar el funcionamiento óptimo de los equipos de bombeo pues es justo en ese punto encontraremos la máxima eficiencia que nos puede entregar la bomba, cabe resaltar que para que se trabaje en este punto durante toda la operación de vaciado de cárcamo, el gasto y la carga deben de permanecer constantes. La curva característica de la bomba seguirá siendo la misma pues no hay variaciones en el diámetro. Por otra parte, como se puede ver en las ecuaciones descritas para la curva del sistema debido al cambio en la diferencia de altura está será una curva que cambiará su posición en función de la carga estática como puede verse en la Figura 3-5.

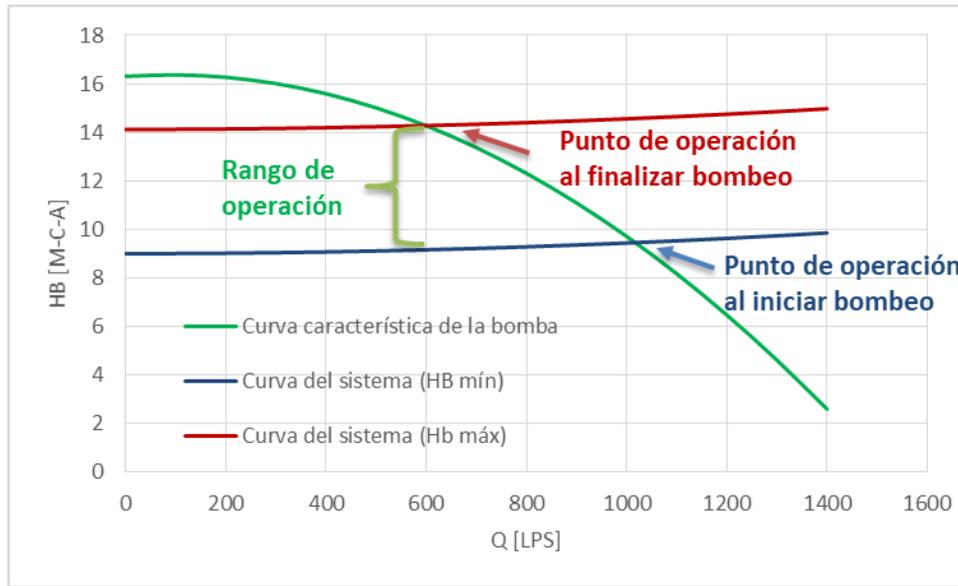


Figura 3-5. Puntos de operación de una bomba

En la gráfica se puede observar el comportamiento de la curva del sistema con respecto a la curva de bombeo correspondiente a un sólo equipo, la intersección que hay entre ambas muestra el punto de operación. Conforme va reduciendo el nivel de agua en el cárcamo la diferencia de altura aumenta. Entonces la curva del sistema hará un recorrido ascendente lo cual cambiará el punto de operación a uno con un gasto que se irá reduciendo pues son variables inversamente proporcionales (Tabla 3-8).

Tabla 3-8. Comportamiento de una bomba en función del gasto

Gasto Q	Carga Hm	Pérdidas totales (H)		Eficiencia η
		Hmin	Hmáx	
[l/s]	[m]	[m]	[m]	%
0	16.31	9.00	14.12	-
100	16.37	9.00	14.12	17.21
200	16.27	9.02	14.14	28.75
300	16.01	9.04	14.16	40.19
400	15.59	9.07	14.19	51.12
500	15.01	9.11	14.23	61.14
600	14.27	9.16	14.28	69.84
700	13.37	9.21	14.33	76.83
800	12.31	9.28	14.40	81.71
900	11.09	9.35	14.47	84.06
1000	9.71	9.44	14.56	83.50

1100	8.17	9.53	14.65	79.62
1200	6.47	9.63	14.75	72.02
1300	4.61	9.74	14.86	60.29
1400	2.59	9.85	14.97	44.04

3.4. Cálculo de la curva característica de la bomba mediante la medición del gasto

Para corroborar la información obtenida mediante las curvas características del catálogo de las bombas se construyó una curva característica con base en la medición del cambio en el nivel del cárcamo y el gasto. Para este cálculo, se utilizó el polinomio que se obtuvo de la curva característica de la bomba el cual está diseñado para darnos un valor de carga en función del gasto. Al obtener el valor de la carga con distintos gastos, éste se comparaba con el valor de carga en nivel del cárcamo el cual fue monitoreado mediante los sensores instalados en la planta.

3.5. Eficiencia del conjunto bomba-motor

Comprobar que el conjunto bomba-motor trabaje de forma eficiente al momento del vaciado del cárcamo es una medida obligatoria para el cumplimiento de la NOM-006-ENER-2015 pues en el apartado 6.1. “Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo para pozo profundo en operación, menciona que cualquier sistema de bombeo para pozo profundo que utilice energía eléctrica para su operación” debe cumplir con los valores mínimos de eficiencia establecidos en la tabla 3-9¹².

Tabla 3-9. Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo para pozo profundo en operación

Intervalo de potencias		Eficiencia electromecánica (conjunto motor bomba (%))	
kW	Hp	Bomba con motor sumergible	Bomba con motor externo
5.6-14.9	7.5-20	35	52
15.7-37.3	21-50	47	56
38.0-93.3	51-125	57	60
94.0-261	126-350	59	64

¹² (NOM-006-ENER-2015. Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y método de prueba., 2015, pág. 5)

El equipo con el que cuenta la planta debe cumplir una eficiencia electromecánica del conjunto bomba motor del 59%. En la NOM-006-ENER-2015 definen el cálculo de la eficiencia electromecánica con la siguiente ecuación:

$$\eta_{b-m} = \frac{P_s}{P_e} * 100 \quad (3-6)$$

Donde:

Ps= Potencia de salida de la bomba

Pe= Potencia de entrada al motor

3.5.1. Cálculo de la potencia de salida de la bomba

También definido como potencia hidráulica, se obtiene como el producto del gasto por la densidad del fluido, la aceleración gravitacional y la carga hidráulica. Es la potencia que la bomba le transfiere al agua que impulsa inmediatamente a la salida del impulsor.

$$P_s = Pot_H = Q \rho g H \quad (3-7)$$

Variando los valores de gasto y carga hidráulica y considerando a la aceleración gravitacional y la densidad como valores constantes, se obtuvo la variación en la potencia hidráulica (Tabla 3-10).

Tabla 3-10. Valores de la potencia hidráulica de una bomba

Gasto	Carga	Potencia hidráulica	
		[kW]	[HP]
100	16.37	16.06	21.53
200	16.27	31.92	42.79
300	16.01	47.12	63.16
400	15.59	61.17	82.00
500	15.01	73.62	98.69
600	14.27	83.99	112.59
700	13.37	91.81	123.07
800	12.31	96.61	129.50
900	11.09	97.91	131.25
1000	9.71	95.25	127.69
1100	8.17	88.16	118.18
1200	6.47	76.16	102.10

3.5.2. Medición de la potencia de entrada al motor

Es la potencia que requiere el motor eléctrico acoplado a la bomba y en operación normal. En motores trifásicos como los motores con los que cuentan las bombas de la planta, el cálculo de la potencia eléctrica se define de la siguiente forma¹³:

$$P_e = \sqrt{3} V I F.P \quad (3-8)$$

Como la planta de bombeo no cuenta con una medición en tiempo real de la potencia que demanda el motor, ni de la intensidad de corriente y el factor de potencia, se debe de tomar mediciones estas variables para el cálculo de la potencia eléctrica.

Posteriormente, se debe de correlacionar esta información con los datos hidráulicos que se cuentan, para observar el cambio de la potencia con respecto a la carga hidráulica. (Tabla 3-11)

Tabla 3-11. Valores eléctricos medidos de una bomba en operación

Medición de la potencia eléctrica de una bomba en operación						
Gasto	Carga	Diferencia de potencial	Intensidad de corriente	Factor de potencia	Potencia Eléctrica	
[l/s]	[m]	[V]	[A]	[adim]	[kW]	[HP]
600	14.27	467.80	329.00	0.66	174.87	234.51
700	13.37	467.33	329.00	0.65	174.43	233.82
800	12.31	467.20	329.20	0.65	173.99	233.33
900	11.09	466.47	329.03	0.65	172.26	231.01
1000	9.71	466.07	326.87	0.65	170.98	229.29

3.5.3. Cálculo de la eficiencia del conjunto bomba-motor

Al ser uno de los parámetros que deben cuidarse por para evitar la sustitución de equipos o rediseño de la planta de bombeo, se vuelve fundamental hacer un cálculo de la eficiencia con los datos tomados in-situ pues con ello podemos conocer el estado actual real de cada una de las bombas para saber si algún equipo requiere de mantenimiento preventivo.

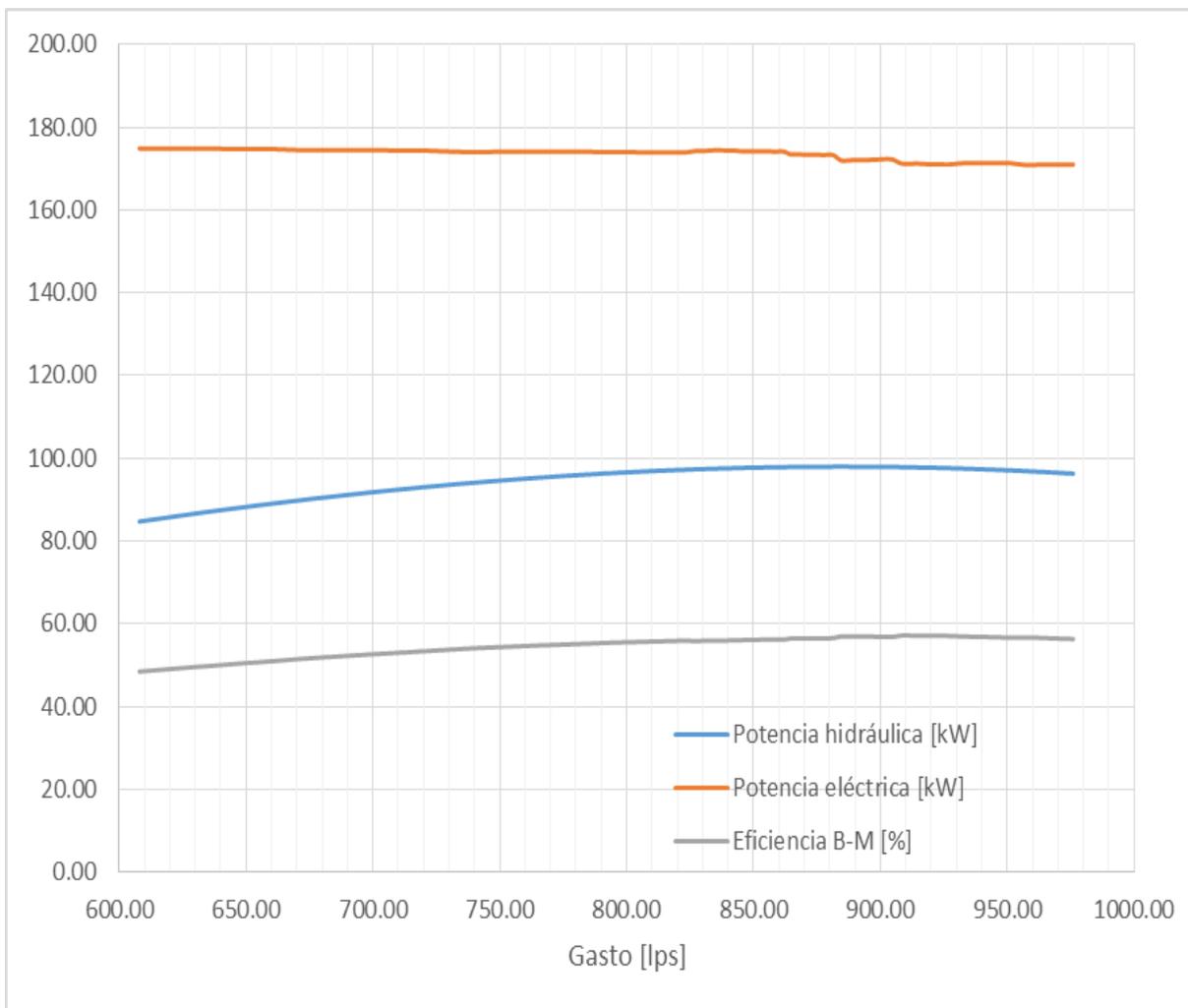
¹³ (NOM-006-ENER-2015. Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y método de prueba., 2015, pág. 4)

Con las cifras correspondientes a la potencia hidráulica y la potencia eléctrica, se calcula la variación en la eficiencia con respecto a la carga hidráulica. Los resultados se muestran en la Tabla 3-12.

Tabla 3-12. Rango de eficiencias del conjunto bomba-motor de un equipo

Gasto	Carga	Potencia Hidráulica		Potencia Eléctrica		Eficiencia conjunto bomba-motor %
		[kW]	[HP]	[kW]	[HP]	
0	16.31	0	0	-	-	-
100	16.37	16.06	21.53	-	-	-
200	16.27	31.92	42.79	-	-	-
300	16.01	47.12	63.16	-	-	-
400	15.59	61.17	82.00	-	-	-
500	15.01	73.62	98.69	-	-	-
600	14.27	83.99	112.59	174.87	234.51	48.03
700	13.37	91.81	123.07	174.43	233.82	52.64
800	12.31	96.61	129.50	173.99	233.33	55.52
900	11.09	97.91	131.25	172.26	231.01	56.84
1000	9.71	95.25	127.69	170.98	229.29	55.71
1100	8.17	88.16	118.18	-	-	-
1200	6.47	76.16	102.10	-	-	-
1300	4.61	58.79	78.81	-	-	-

Figura 3-6. Comportamiento de las potencias y eficiencias con respecto al gasto



En la figura se ve reflejada la relación existente entre la potencia hidráulica y la potencia eléctrica. Cuanto más se aproximen tendrán un valor de la eficiencia bomba-motor más grande lo cual se busca para dar cumplimiento con la NOM-006-ENER-2015.

Capítulo IV. Propuestas de ahorro y uso eficiente de energía

4.1. Operación diaria de la planta de bombeo

Aproximadamente, la planta de bombeo realiza 6 descargas diarias por 7 periodos de llenado del cárcamo según la información registrada en la bitácora de operación. El periodo de vaciado promedio dura 1 hora con 25 minutos mientras que el periodo de llenado del cárcamo dura 2 horas con 13 minutos. Esto puede variar por el tipo de planta de bombeo que se estudia, pues maneja aguas combinadas, por lo cual el estudio se limita a la temporada seca del año donde el caudal de llenado del cárcamo es más estable que podemos considerar constante.

Al medir el tiempo de vaciado y relacionarlo con la disminución en el nivel dinámico, del gasto y con la eficiencia del sistema bomba-motor se observa una operación que puede mejorar en sus prácticas. La planta de bombeo, por las condiciones de diseño cuenta con un nivel de inicio y fin de bombeo (Tabla 1-1) de los cuales sólo se cumple con el inicio de bombeo.

Salir de las condiciones de operación establecidas por el perfil hídrico disminuye considerablemente una operación eficiente, lo cual afecta en los aspectos técnicos y económicos.

4.2. Propuestas sin inversión

Hacer un rediseño del plan de bombeo con base en las buenas prácticas de operación es el primer paso para acercarnos a los rangos de eficiencia requeridos. Para que esto suceda, se debe de establecer un rango de operación en el cual los equipos puedan trabajar de forma óptima. De manera inicial se tomarán como rangos de operación los que se dan en el perfil hídrico (Figura 1-1).

4.2.1. Diseño de plan de bombeo con un equipo por descarga

Para el diseño del plan de bombeo de un equipo por descarga, se propone la siguiente metodología:

- Partiendo del punto de inicio de bombeo establecido en la Tabla 1-1, se hace un cálculo de las condiciones hidráulicas y eléctricas del sistema.
- Se tomará la Tabla 3-12. hasta el punto de finalización del bombeo y se verá que cumple con la eficiencia mínima requerida por la NOM-006-ENER-2015 del 59%, de no ser así se excluirán esos puntos.
- Se delimitará el rango de operación con respecto a los valores de eficiencia que cumplan con el mínimo establecido.

- A partir de los nuevos rangos de operación en función de la eficiencia, se calculará el tiempo de vaciado del cárcamo.
- Partiendo del nivel del cárcamo donde finalice el bombeo, se calculará el tiempo aproximado de llenado del cárcamo.
- Finalmente, se reestablecerá el número de arranques por día y periodos de llenado para el plan de bombeo.

Tabla 4-1. Muestra de las condiciones hidráulicas y eléctricas del sistema

Gasto	Carga	Potencia Hidráulica		Potencia Eléctrica		Eficiencia conjunto bomba-motor	Cumplimiento de la NOM
		[l/s]	[m]	[kW]	[HP]		
0	16.31	0	0	-	-	-	-
100	16.37	16.06	21.53	-	-	-	-
200	16.27	31.92	42.79	-	-	-	-
300	16.01	47.12	63.16	-	-	-	-
400	15.59	61.17	82.00	-	-	-	-
500	15.01	73.62	98.69	-	-	-	-
600	14.27	83.99	112.59	174.87	234.51	48.03	No cumple
700	13.37	91.81	123.07	174.43	233.82	52.64	No cumple
800	12.31	96.61	129.50	173.99	233.33	55.52	No cumple
900	11.09	97.91	131.25	172.26	231.01	56.84	No cumple
1000	9.71	95.25	127.69	170.98	229.29	55.71	No cumple
1100	8.17	88.16	118.18	-	-	-	-
1200	6.47	76.16	102.10	-	-	-	-
1300	4.61	58.79	78.81	-	-	-	-
Valor mínimo de eficiencia bomba-motor: 59%							

Considerando los rangos de operación establecidos por el perfil hidráulico, cada periodo de vaciado debe iniciar cuando el nivel dinámico sea de 7.67 metros y finalizar cuando éste llegue a los 2.55 metros. Por lo que aproximadamente debe iniciarse con una carga de 9.26 m y un gasto de 1030 lps y finalizar cuando la carga sea de 13.91 metros y el gasto de 640 lps

Con estos rangos de operación el tiempo aproximado de vaciado del cárcamo es de 1 hora y el de llenado también disminuye a 2 horas.

4.2.2. Diseño de plan de bombeo con dos equipos por descarga

Se utilizará la misma metodología que en el plan de bombeo con un equipo por descarga para el diseño de un plan de bombeo en el cual entren en operación dos equipos en cada periodo de descarga. Cuando más de una bomba entra en operación en un sistema de bombeo, se estudia a cada equipo por separado. Se hará la consideración de que ambas bombas trabajan en forma conjunta, por lo que al obtener los datos correspondientes a la potencia eléctrica, se dividirán entre dos para estimar la eficiencia del conjunto bomba-motor por separado (se hace esta consideración porque los datos han sido recopilados del analizador de redes son de la demanda total del sistema y no por equipo).

Tabla 4-2. Información de la operación de dos equipos con el plan de operación propuesto

Bomba 1/Bomba 2							
Gasto	Carga	Potencia Hidráulica		Potencia Eléctrica		Eficiencia	Cumplimiento de la NOM
[lps]	[m]	[kW]	[Hp]	[kW]	[Hp]	%	
937.5	10.05	92.48	124.02	163.39	219.10	56.60	No cumple
904.5	10.21	90.61	121.50	163.39	219.10	55.46	No cumple
883	10.41	90.20	120.96	163.63	219.43	55.13	No cumple
872	10.59	90.60	121.50	163.75	219.59	55.32	No cumple
854	11.03	92.42	123.93	163.46	219.21	56.54	No cumple
837.5	11.31	92.91	124.60	163.16	218.80	56.95	No cumple
817	11.58	92.85	124.51	163.32	219.01	56.85	No cumple
786.5	11.77	90.80	121.77	162.65	218.11	55.83	No cumple
741.5	11.97	87.09	116.79	162.22	217.54	53.69	No cumple
686.5	12.29	82.79	111.02	161.97	217.21	51.11	No cumple
618	12.69	76.96	103.20	161.97	217.21	47.51	No cumple
Valor mínimo de eficiencia bomba-motor: 59%							

4.3. Análisis de propuesta sin inversión

La operación habitual en la planta de bombeo se muestra en la siguiente tabla y se utilizará como base para diferenciar los resultados posteriores a la aplicación del plan de bombeo

Tabla 4-3. Operación habitual promedio de la planta en temporada seca

Tiempo [hr]	Operación	Repeticiones al día	Horas por día	kWh x día (promedio)	kWh x mes
1hr 25min	Bombeo	6	8.5	1634.34	49030.17
2hrs 13min	Llenado	7	15.5		

4.3.1. Plan de bombeo de un equipo por descarga

Tomando en cuenta las restricciones dadas por el perfil hidráulico de la planta de bombeo, el Plan de Bombeo propuesto queda definido en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4. Plan de bombeo diario para uso de un equipo en operación al vaciar cárcamo

Plan de bombeo para propuesto para uso de un equipo por descarga		
Horario	Numero de vaciado	Bomba
00:00 a 01:00	1	1
03:00 a 04:00	2	2
06:00 a 07:00	3	3
09:00 a 10:00	4	4
12:00 a 13:00	5	5
15:00 a 16:00	6	6
18:00 a 19:00	7	1
21:00 a 22:00	8	2

4.3.2. Plan de bombeo de dos equipos por descarga

El plan que se presenta a continuación en la Tabla 4-5 considera los niveles de operación en los cuales debería estar trabajando la planta según se describe en el plan hidráulico presente en la Tabla 1-1.

Tabla 4-5. Plan de bombeo diario para uso de dos equipos en operación al vaciar cárcamo

Plan de bombeo propuesto para uso de dos equipos por descarga		
Horario	Numero de vaciado	Bombas
00:00 a 00:25	1	1 y 6
02:25 a 02:50	2	2 y 5
04:50 a 05:15	3	3 y 4
07:15 a 07:40	4	1 y 6
09:40 a 10:05	5	2 y 5
12:05 a 12:30	6	3 y 4
14:30 a 14:55	7	1 y 6

16:55 a 17:20	8	2 y 5
19:20 a 19:45	9	3 y 4
21:45 a 22:10	10	1 y 6

En este plan alterno (Tabla 4-6) considera solo 20 minutos por bombeo, evitando entrar en la zona que se encuentra por debajo del 10% menos de la eficiencia mínima requerida para este tipo de equipos.

Tabla 4-6. Plan de bombeo alterno para uso de dos equipos al vaciar el cárcamo

Plan de bombeo propuesto para uso de dos equipos por descarga		
Horario	Numero de vaciado	Bombas
00:00 a 00:20	1	1 y 6
02:10 a 02:30	2	2 y 5
04:20 a 04:40	3	3 y 4
06:30 a 06:50	4	1 y 6
08:40 a 09:00	5	2 y 5
10:50 a 11:10	6	3 y 4
13:00 a 13:20	7	1 y 6
15:10 a 15:30	8	2 y 5
17:20 a 17:40	9	3 y 4
19:30 a 19:50	10	1 y 6
21:40 a 22:00	11	2 y 5
23:50 a 24:00	12	3 y 4

4.3.3. Comparativo de planes de bombeo

En el plan de bombeo para una bomba en operación propuesto se indica que cada periodo de vaciado será de 60 minutos, mientras que en el plan de bombeo para dos bombas en operación se indica que cada periodo de vaciado será de 25 minutos.

La disminución en el tiempo de vaciado entre el segundo plan de bombeo con respecto al primero no sólo se debe al aumento del gasto; ya que encontramos un gasto de entrada, al disminuir el tiempo de vaciado también disminuye el tiempo que le damos al cárcamo para llenarse, esto quiere decir que cuanto menos tiempo tardemos en dejar el nivel para la finalización del bombeo (Tabla 1-1) menos tiempo bombearemos el gasto de entrada.

Para calcular la demanda en cada plan debemos utilizar la siguiente ecuación:

$$kWh = \text{Tiempo [hr]} \times \text{Consumo de energía [kW]} \quad (4-1)$$

En cada caso obtendremos la demanda del sistema de bombeo por cada arranque, dependiendo del número de arranques por día se obtendrá la demanda diaria para finalizar con el cálculo de la demanda mensual del sistema de bombeo. Para realizar el cálculo, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$kWh_{día} = kWh \times \text{Número de arranques por día} \quad (4-2)$$

Y Para la demanda mensual,

$$kWh_{mes} = kWh_{día} \times \text{Días del mes} \quad (4-3)$$

Los resultados quedan expuestos en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7. Comparativa de Planes de bombeo propuestos

	1 bomba en operación	2 bombas en operación
Consumo promedio [kW]	174.5267	326.5812
Tiempo de vaciado [min]	60	25
kWh por vaciado	174.5267	133.8982
kWh al día	1 396.21	1 351.68
kWh al mes	41886.24	40 550.50

Esta información da como resultado un ahorro de energía aproximado de 1,335.74 kWh al mes, lo que implica una disminución del 3.18% en la demanda eléctrica entre los planes propuestos.

El ahorro de energía es aún más notorio al comparar el consumo de energía que hay actualmente en la planta con su metodología de vaciado de cárcamo con respecto a la operación con los nuevos planes de bombeo planteados. En la tabla 4-8 queda reflejado este ahorro, tan sólo con el cambio en la operación de vaciado-llenado.

Tabla 4-8. Ahorro de energía por cambio de rango de operación

	1 bomba en operación	1 bomba en operación
Consumo promedio [kW]	174.5267	174.5267
Tiempo de vaciado [min]	85	60
kWh por vaciado	257.25	174.5267
kWh al día	1 634.34	1 396.21
kWh al mes	49 030.17	41 886.24
Ahorro de energía aproximado [%]	14.57	

Ahora, haciendo una comparación entre la metodología actual y el plan propuesto de dos bombas en operación se ve un incremento mayor en el ahorro de energía, como se muestra en la tabla 4-9.

Tabla 4-9. Ahorro de energía por uso de dos bombas con el plan propuesto

	1 bomba en operación	2 bombas en operación
Consumo promedio [kW]	174.5267	326.5812
Tiempo de vaciado [min]	85	25
kWh por vaciado	257.25	133.8982
kWh al día	1 634.34	1 351.68
kWh al mes	49 030.17	40 550.50
Ahorro de energía aproximado [%]	17.29	

4.3.4. Costo mensual de la energía consumida por el sistema para la temporada seca

El costo mensual de la energía consumida por el sistema se calcula mediante la tarifa eléctrica establecida por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH).

La razón de que se establezca la tarifa GDMTH para la planta de bombeo yace en la demanda de la misma. Cada equipo de bombeo requiere de más de 100 kW para su funcionamiento.

Para la tarifa GDMTH, se establecen varios rubros de cobro (Anexo 1) para los cuales interesa conocer los periodos en los cuales existe un consumo de energía, así como la demanda de la misma.

Para calcular la demanda cuando no se tiene facturación disponible como es el caso, la CFE establece la siguiente fórmula:

$$Demanda = \frac{Qmensual}{24 * d * FC} \quad (4-4)$$

Donde:

Qmensual: Kilowatts-hora consumidos en un mes

d: Días de facturación

FC: Factor de Carga (Definido en el Anexo 1)

Tabla 4-10. Valores de la demanda calculada para cada escenario

Escenarios	Qmensual	Demanda
	[kwh mensual]	[kW]
1 Bomba	49 030.17	119.4692274
1 Bomba (nuevo plan)	41 886.24	102.0619883
2 Bombas (propuesta)	40 550.50	98.80727054

Una vez conocida la demanda, se calculan los cargos por distribución y capacidad al multiplicarla por los factores dados por CFE para estos dos rubros.

Además de los cargos por distribución y capacidad, se hace un cargo de tarifa que se divide en horarios base, intermedio y punta. Ésta depende del mes y del año, para este caso se tomó el mes y el año en el cual se realizaron las mediciones. Los valores de los factores de la tarifa base, media y punta están definidos en el Anexo 1.

Finalmente, existe un cargo fijo que también es dado por la CFE dependiendo del mes.

Todos estos cargos se suman, lo cual nos da como resultados los totales establecidos para cada uno de los tres casos en las tablas 4-11, 4-12 y 4-13:

Tabla 4-11. Cálculo del costo de operación mensual de una bomba

	Base	\$
Tarifa Horaria	Intermedia Punta	87,048.94
	\$/kW	
Distribución	65.67	7,845.54

Capacidad	455.57	54,426.60
	\$/mes	
Fijo	654.45	654.45
		TOTAL
		149,975.53

Este es el costo aproximado de la operación mensual en temporada seca para el periodo de Septiembre, mes en el cual se realizaron las mediciones.

Tabla 4-12. Cálculo de costo de operación de una bomba con plan propuesto

	Base	\$
Tarifa Horaria	Intermedia Punta	73,024.89
	\$/kW	
Distribución	65.67	6,702.41
Capacidad	455.57	46,496.38
	\$/mes	
Fijo	654.45	654.45
		TOTAL
		126,878.13

Al cambiar los periodos de descarga de la bomba como se hizo en el plan propuesto para una bomba, se puede observar un ahorro aproximado del 15.40% lo cual es bastante bueno al considerar que lo único que se realizó fue un cambio en los hábitos operativos.

Tabla 4-13. Cálculo de costo de operación de dos bombas con plan propuesto

	Base	\$
Tarifa Horaria	Intermedia Punta	71,993.75
	\$/kW	
Distribución	65.67	6,488.67
Capacidad	455.57	45,013.63
	\$/mes	
Fijo	654.45	654.45
	TOTAL	124,150.51

Ahora, al cambiar el número de equipos como en el plan propuesto para dos bombas, se puede observar un incremento en el ahorro anterior de un 2.15% el cual es significativo, más si se considera que el ahorro final puede ser aproximadamente de un 17.21 % con respecto a las condiciones actuales de operación.

4.4. Propuesta con inversión.

4.4.1. Sustitución de motores eléctricos

En el caso particular de esta planta de bombeo, se podría plantear la posibilidad de hacer un estudio de viabilidad para la sustitución de motores. Debido a los años de funcionamiento de la planta de bombeo, la inversión no parece viable actualmente pero se recomienda un análisis de inversión a futuro una vez que los equipos hayan sido amortizados y a su vez hayan cubierto su vida útil.

4.4.2. Instalación de variadores de frecuencia

Cuando las buenas prácticas no son suficientes para generar un ahorro de energía a pesar de que se esté trabajando de forma eficiente es conveniente buscar otro tipo de soluciones las cuales probablemente requieran de una inversión de capital.

En particular, la solución propuesta por expertos en ahorro de energía para este tipo de instalaciones es la de instalar variadores de frecuencia en los equipos. Los variadores de frecuencia tienen un costo elevado, por lo que deben de generar un verdadero ahorro en el uso de energía para que esto se vea reflejado en un ahorro económico que nos

permita garantizar la viabilidad de la inversión. Esta viabilidad dependerá del periodo de recuperación de la inversión con respecto a la vida estimada de la planta de bombeo.

Capítulo V. Resultados

Después del estudio hidráulico de la planta de bombeo se logró plantear un rango de operación de la bomba el cual resulta en función de la carga hidráulica por lo que será un valor que variará con respecto a ésta.

La modificación en los hábitos operacionales de la planta de bombeo resultaron en un ahorro de energía aproximado del 14.6 %, cifra que se obtuvo al considerar los rangos operativos establecidos en la Tabla 1-1 y a la operación de una bomba por cada descarga. Si a esto se le añade el uso de dos equipos de bombeo por cada descarga del cárcamo el ahorro de energía se incrementa a un 17.3%. Esto se refleja en la Figura 4-1.

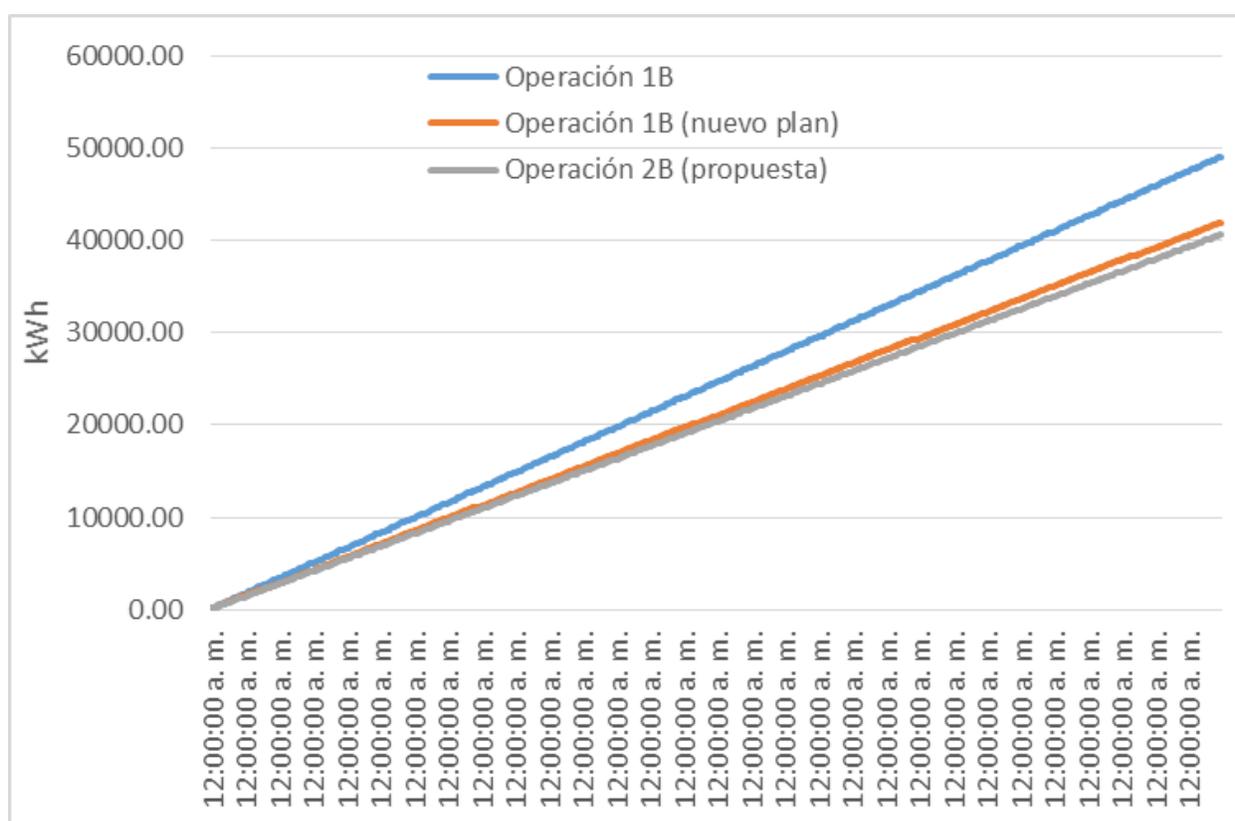


Figura 5-1. Gráfica comparativa de consumo mensual de la planta de bombeo

Obteniendo el ahorro de energía esperado se planteó encontrar un estimado del ahorro de capital que se obtendría de cada plan de bombeo. En el caso en el cual sólo hubo modificación en los hábitos operacionales se encontró un ahorro del 15.4% el cual es similar al ahorro de energía y en cuando al uso de dos equipos de bombeo por vaciado del cárcamo se encontró un ahorro del 17.21% mensual.

Al poner en operación el plan de bombeo propuesto se obtuvo un incremento en la eficiencia del sistema bomba motor lo cual convierte a la planta de bombeo en una instalación no sólo más eficiente, sino también en una instalación que aunque no cumple con el valor de eficiencia mínima para equipos sumergibles establecido por la NOM-006-ENER-2015, ésta se aproxima al valor establecido y no baja del 10% establecido para la sustitución de equipos o redimensionamiento de la planta de bombeo. La Figura 4-2 refleja el comportamiento de la eficiencia bomba-motor en función del gasto para un equipo de bombeo y para dos, recordando que en el caso de dos equipos se hace mediante la eficiencia equivalente.

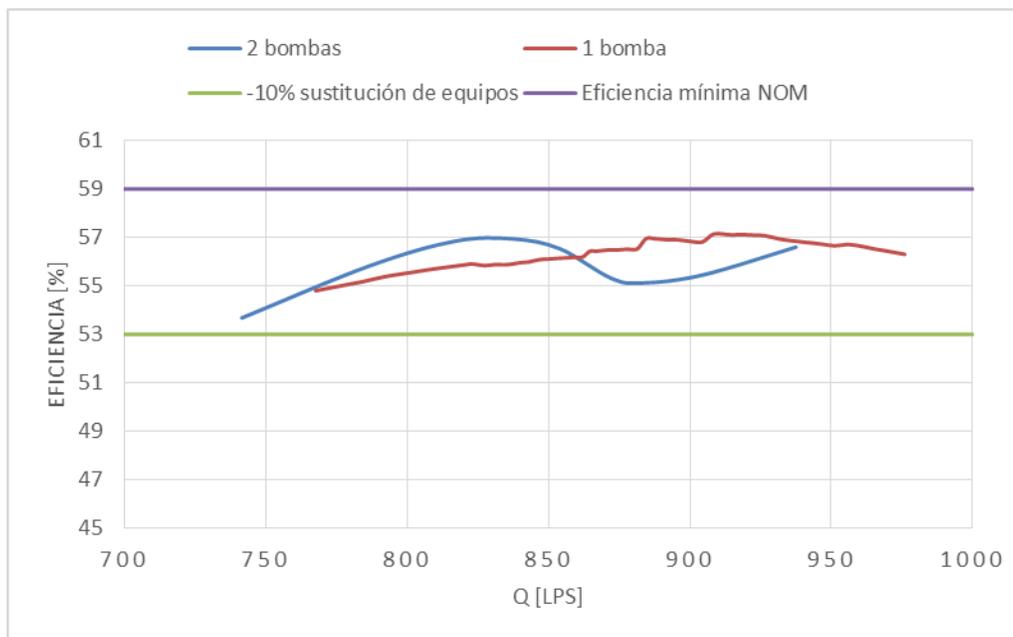


Figura 5-2. Comportamiento de la Eficiencia Bomba-Motor para 1 y 2 equipos

Este estudio se tuvo que limitar a la temporada seca del año debido a varios factores. El primero fue el desconocimiento de los metros cúbicos de agua en esa temporada, pues es una variable que cambia constantemente y el segundo y más importante es que en temporada de lluvia el objetivo de la planta es evitar las inundaciones de la zona manteniendo en cero el nivel del sensor del cárcamo como procedimiento de seguridad, sin importar el número de bombas que necesiten encender para conseguirlo.

5.1. Conclusiones

Después de analizar la información es evidente que tener buenas prácticas operativas puede ser un factor fundamental al momento de querer operar con eficiencia y de ahorrar energía.

Se pudo observar que al no trabajar en los rangos establecidos por el perfil hídrico la planta de bombeo pierde tanto eficiencia en el conjunto bomba-motor de sus equipos como energía, esto se traduce en un mayor consumo de energía mensual lo que incrementa la facturación de la planta.

Operar fuera de rango también afecta la vida de los equipos, por lo que no es recomendable que se salga de los parámetros establecidos en este trabajo en el Plan de Bombeo, eso evitará que la eficiencia sea muy baja y que al bajar mucho el espejo de agua esta pueda dejar descubiertos a los equipos que al trabajar utilizan el agua como refrigerante.

Es fundamental cambiar los hábitos operativos, prestando una constante atención en los monitores el nivel de agua, pues la variable que podemos controlar para que el sistema trabaje como se espera es la carga.

Se hace la recomendación de utilizar el Plan de Bombeo propuesto para el uso de dos bombas con descargas cada 25 minutos con periodos de llenado de cárcamo de 2 horas, pues aunque no hay gran variación entre éste y el Plan de Bombeo propuesto para un equipo, tener ese ahorro adicional de energía del 3.18% y del 2.15% en capital servirá para amortizar las pequeñas variaciones que pudiesen darse en el tiempo de llenado y vaciado por algún volumen de agua inusual que se presentase o en caso de un gasto constante como se presentó en el trabajo, un mayor ahorro, lo cual era uno de los objetivos presentados.

Bibliografía

CONAGUA (2007), Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de instalaciones mecánicas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. pp. 1-31.

INDAR (2011), Catálogo de electrobombas serie BF en estándar a 60Hz, Beasain, Gipuzkoa, España, pp. 34-35

Sistemas Hidroneumáticos C.A, Manual de procedimiento para el cálculo y selección de sistema de bombeo, Caracas, Venezuela, pp. 6-17

DOF (2015), NOM-006-ENER-2015, Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y método de prueba, México, pp. 2-16

CONAGUA (2003), Eficiencia en sistemas de bombeo, Gerencia de estudios y proyectos coordinación de electromecánica, Subdirección general de infraestructura hidráulica urbana, Unidad de agua potable y saneamiento, México, pp. 5-14

SENER, Glosario de términos de electricidad, PDF, <<sie.energia.gob.mx/docs/glosario_elec_es.pdf>>, fecha de consulta: 27/05/2019

Organización Panamericana de la Salud (1966), Apuntes del curso intensivo. Bombas para agua potable, Publicación científica No. 145, Washington, DC., E.U.A, pp. 2-24

CFE (2017), Anexo B del A/058/2017, Metodología de cálculo y ajuste de las tarifas finales de suministro básico, México, p. 38

ANEXOS

Anexo 1. Información CFE

Valle de México Sur

Tarifa	Descripción	Int. Horario	Cargo	Unidades	SEP-18
GDMTH	Gran demanda en media tensión horaria	-	Fijo	\$/mes	654.45
		Base	Variable (Energía)	\$/kWh	1.2189
		Intermedia	Variable (Energía)	\$/kWh	2.0408
		Punta	Variable (Energía)	\$/kWh	2.3946
		-	Distribución	\$/kW	65.67
		-	Capacidad	\$/kW	455.57

Los cargos de las tarifas finales del suministro básico descritos en este apartado, corresponden a la integración de los cargos por Transmisión, Distribución, Operación del CENACE, Operación del Suministrador Básico, Servicios Conexos No MEM, Energía y Capacidad.

Para mayor información sobre las cuotas aplicables favor de consultar el apartado de [Acuerdos que autorizan o modifican tarifas.](#)

TABLA 6. FACTOR DE CARGA

Grupo Tarifario	Factor de Carga
DB1	0.59
DB2	0.59
PDBT	0.58
GDBT	0.49
RABT	0.50
APBT	0.50
APMT	0.50
GDMTH	0.57
GDMTO	0.55
RAMT	0.50
DIST	0.74
DIT	0.71

Fuente: CFE

Anexo 2. Información Bombas INDAR

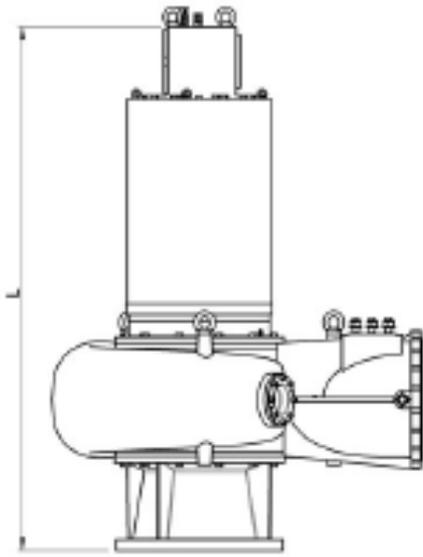


BF-60-B2 12

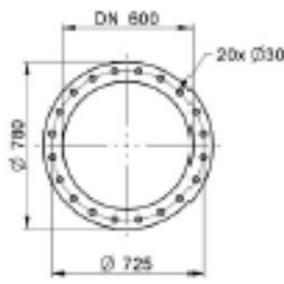
Curvas para materiales estándar
Curves for standard materials
Courbes pour matériaux standard

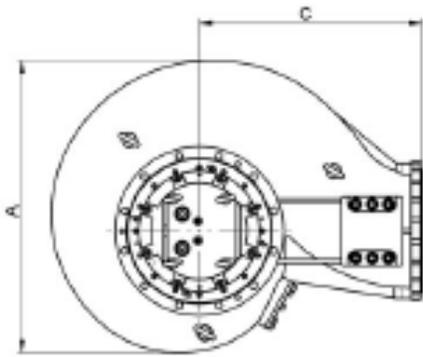
Paso de sólidos
Maximum freeway 215x190 mm.
Passage Integral

r.p.m.: 590
Hz: 60

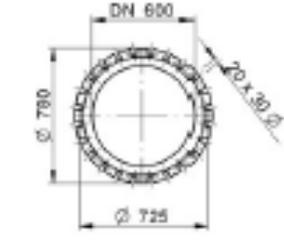


ASPIRACION
SUCTION
ASPIRATION





IMPULSION
DISCHARGE
REFOULEMENT



V<1000 Volts					V>1000 Volts						
MOTOR MOTOR MOTEUR	PN	DIMENSIONES DIMENSIONS (mm)			PESO WEIGHT POIDS (Kg)	MOTOR MOTOR MOTEUR	PN	DIMENSIONES DIMENSIONS (mm)			PESO WEIGHT POIDS (Kg)
	KW	A	C	L			KW	A	C	L	
MF-280-12/85	75	1554	1100	2400	3810	MF400-12/180	210	1554	1100	3245	6580
MF-280-12/85	98	1554	1100	2600	3089						
MF-315-12/02	107	1554	1100	2485	4351						
MF-315-12/110	128	1554	1100	2405	4373						
MF-315-12/130	150	1554	1100	2585	4562						
MF-315-12/180	185	1554	1100	2715	4837						

PN: Potencia nominal - Nominal power - Puissance nominale

Indar

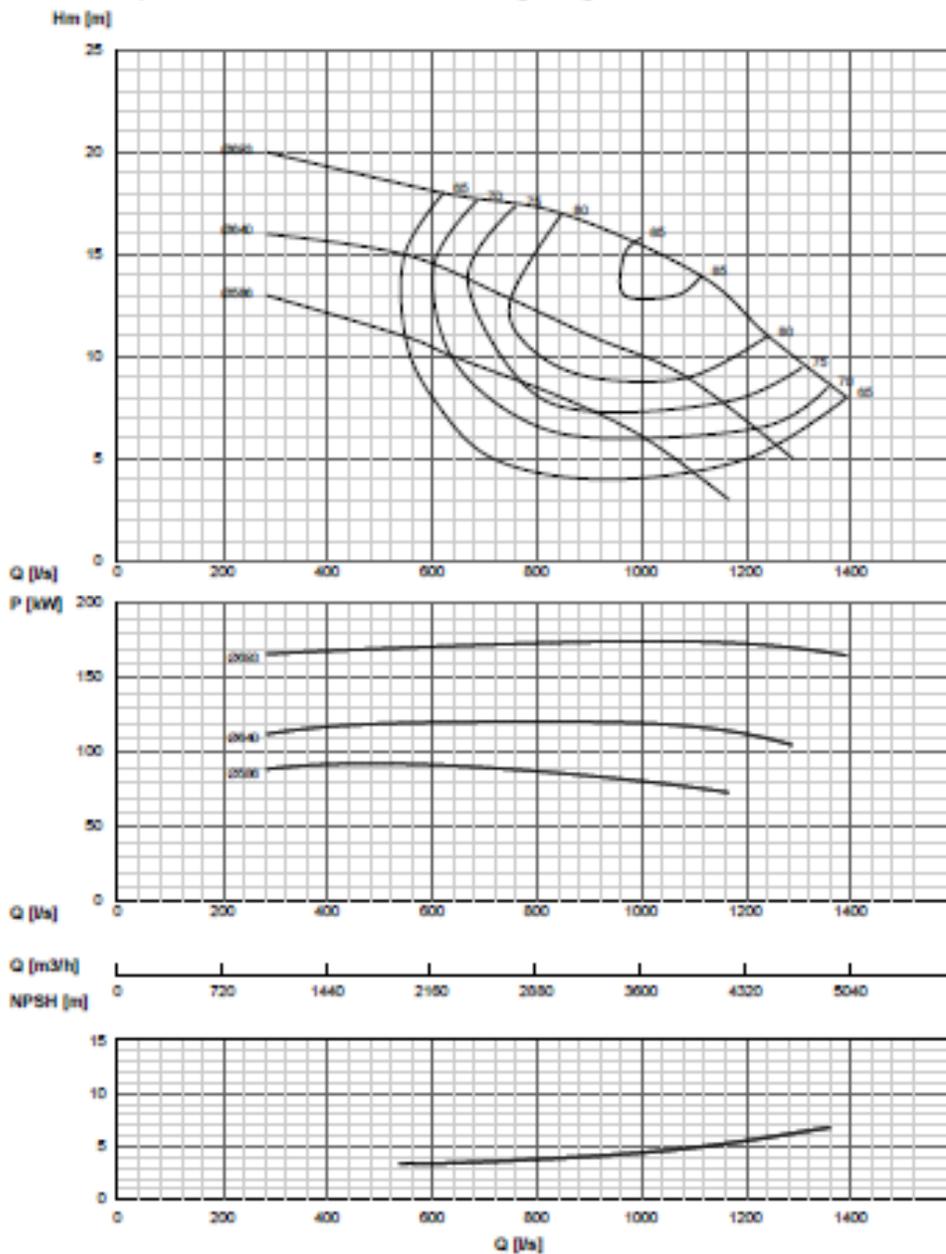
BF-60-B2 12

Curvas para materiales estándar
Curves for standard materials
Courbes pour matériaux standard

Paso de sólidos
Maximum freeway 215x190 mm.
Passage Integral

r.p.m.: 590

Hz: 60



BF-60-B2_12_Rev_0

Curves para agua a 30 °C, densidad de 1 Kg/dm^3 y viscosidad de 1^o cP, de conformidad con ISO 9906 Grado II
Curves for water at 30 °C, density of 1 Kg/dm^3 and a viscosity of 1^o cP, according to ISO 9906 Level II
Courbes pour l'eau à 30 °C, densité de 1 Kg/dm^3 et viscosité de 1^o cP, de conformité avec ISO 9906 Degré II

Anexo 3. Valores de K para pérdidas por accesorios

Pieza, conexión o dispositivo	K_f
Rejilla de entrada	0.80
Válvula de pie	3.00
Entrada cuadrada	0.50
Entrada abocinada	0.10
Entrada de borda o reentrada	1.00
Ampliación gradual	0.30
Ampliación brusca	0.20
Reducción gradual	0.25
Reducción brusca	0.35
Codo corto de 90°	0.90
Codo corto de 45°	0.40
Codo largo de 90°	0.40
Codo largo de 45°	0.20
Codo largo de 22° 30'	0.10
Tee con flujo en línea recta	0.10
Tee con flujo en ángulo	1.50
Tee con salida bilateral	1.80
Válvula de compuerta abierta	5.00
Válvula de ángulo abierta	5.00
Válvula de globo abierta	10.0
Válvula alfallera	2.00
Válvula de retención	2.50
Boquillas	2.75
Controlador de gasto	2.50
Medidor Venturi	2.50
Confluencia	0.40
Bifurcación	0.10
Pequeña derivación	0.03
Válvula de mariposa abierta	0.24

Glosario de figuras

Figura	Descripción	Página
1-1	Perfil hidráulico de la planta de bombeo	3
2-1	Diagrama de bombas de desplazamiento positivo (1)	7
2-2	Diagrama de bombas de desplazamiento positivo (2)	8
2-3	Diagrama de bombas dinámicas (1)	8
2-4	Diagrama de bombas dinámicas (Dinámicas)	9
2-5	Diagrama de bombas para manejo de aguas residuales	10
2-6	Clasificación de bombas centrífugas	11
2-7	Bomba instalada en la planta de bombeo	12
2-8	Diagrama de Moody	15
2-9	Gráfica de curvas del sistema al inicio y al finalizar el vaciado del cárcamo	19
2-10	Curvas en función del gasto	21
2-11	Rango de operación del sistema de bombeo	22
2-12	Curvas características para una y dos bombas	24
2-13	Curvas características para una o más bombas encendidas	25
2-14	Triángulo de potencias	26
3-1	Curvas H-Q	30
3-2	Potencia contra Gasto	32
3-3	NPSHr contra gasto	32
3-4	Curvas del sistema en función de la carga	35
3-5	Puntos de operación de una bomba	36
3-6	Comportamiento de las potencias y eficiencias con respecto al gasto	41
5-1	Gráfica comparativa de consumo mensual de la planta de bombeo	53
5-2	Comportamiento de la Eficiencia Bomba-Motor para 1 y 2 equipos	54

Glosario de tablas

Tabla	Descripción	Página
1-1	Niveles de operación de la planta de bombeo	4
1-2	Volúmenes de agua combinada manejados en la planta	4
2-1	Régimen de flujo	15
2-2	Leyes de Afinidad en función del diámetro y la velocidad del impulsor	25
3-1	Programa actual de vaciado diario de la planta de bombeo	28
3-2	Datos de placa de los equipos de bombeo de la planta	29
3-3	Datos de placa de los motores de las bombas	29
3-4	Datos de las dimensiones de la planta de bombeo	29
3-5	Valores de carga y eficiencia ajustada	31
3-6	Valores de potencia y NPSH ajustada	33
3-7	Pérdidas por fricción y accesorios	34
3-8	Comportamiento de una bomba en función del gasto	36
3-9	Valores mínimos de eficiencia para sistemas de bombeo para pozo profundo en operación	37
3-10	Valores de la potencia hidráulica de una bomba	38
3-11	Valores eléctricos medidos de una bomba en operación	39
3-12	Rango de eficiencias del conjunto bomba-motor de un equipo	40
4-1	Muestra de las condiciones hidráulicas y eléctricas del sistema	43
4-2	Información de la operación de dos equipos con el plan de operación propuesto	44
4-3	Operación habitual promedio de la planta en temporada seca	45

4-4	Plan de bombeo diario para uso de un equipo en operación al vaciar cárcamo	45
4-5	Plan de bombeo diario para uso de dos equipos en operación al vaciar cárcamo	45
4-6	Plan de bombeo alterno para uso de dos equipos al vaciar el cárcamo	46
4-7	Comparativa de Planes de bombeo propuestos	47
4-8	Ahorro de energía por cambio de rango de operación	48
4-9	Ahorro de energía por uso de dos bombas con el plan propuesto	48
4-10	Valores de la demanda calculada para cada escenario	49
4-11	Cálculo del costo de operación mensual de una bomba	49
4-12	Cálculo de costo de operación de dos bombas con plan propuesto	50
4-13	Cálculo de costo de operación de dos bombas con plan propuesto	51

Nomenclatura

A	Área	[m ²]
g	Aceleración gravitacional	[m/s ²]
hd	Altura de descarga	[m]
hs	Altura de succión	[m]
CDT, Hb	Carga dinámica total (carga de bombeo)	[m]
<i>f</i>	Coeficiente de fricción	[adim]
Ki	Coeficiente de pérdidas por accesorios	[adim]
ρ	Densidad	[kg/m ³]
D	Diámetro interno	[m], [mm]
η	Eficiencia	[%]
η_b	Eficiencia de la bomba	[%]
η_{b-m}	Eficiencia conjunto bomba-motor	[%]
FC	Factor de carga	[adim]
FP	Factor de potencia	[adim]
Q	Gasto	[lps], [m ³ /s]
L	Longitud de tubería	[m]
MSNM	Metros sobre nivel del mar	[m]
NPSH	Net Positive Suction Head	[m]
ND	Nivel dinámico	[m]
Nestático	Nivel estático	[m]

Re	Número de Reynolds	[adim]
hf	Pérdidas primarias (por fricción)	[m]
hm	Pérdidas secundarias (por accesorios)	[m]
Hf	Pérdidas totales de carga presentes en la tubería desde la succión hasta la descarga	[m]
PotH, Ps	Potencia hidráulica	[W], [kW]
P; Pe	Potencia activa	[W], [kW]
S	Potencia aparente	[kVA]
Q	Potencia reactiva	[kVAr]
BHP	Potencia al freno (Brake Horsepower)	[W], [kW]
Y	Densidad relativa (peso específico)	[N/m ³]
P	Presión	[kPa]
n	Régimen de giro	[rpm], [1/min]
ε	Rugosidad absoluta	[mm], [m]
T	Temperatura	[°C]
t	Tiempo	[s], [min], [hr], [día], [mes]
v	Velocidad	[m/s]
vc	Viscosidad cinemática	[m ² /s]
μ	Viscosidad dinámica	[kg/m*s]
V	Volumen	[m ³], [lt]

NOM- Norma Oficial Mexicana

BEP- Best Efficient Point (Punto de máxima eficiencia)

