



Vigilada Mineducación

Optimización energética en sistemas de bombeo con bombas centrífugas, desarrollo de un caso práctico

Lina Marcela Valderrama García

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería

Asesor

Luis Fernando Quirós Morales

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MEDELLÍN

2022

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>- 11 -</b>
<b>2</b>	<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>- 12 -</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>- 13 -</b>
3.1	GENERAL.....	- 13 -
3.2	ESPECÍFICOS.....	- 13 -
<b>4</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>- 14 -</b>
4.1	DEFINICIONES BÁSICAS .....	- 14 -
4.2	CONCEPTOS RELACIONADOS CON SISTEMAS DE BOMBEO .....	- 15 -
4.2.1	<i>Clasificación de las Bombas</i> .....	- 15 -
4.2.2	<i>Bomba hidráulica</i> .....	- 16 -
4.2.3	<i>Bomba centrífuga o rotodinámica</i> .....	- 16 -
4.3	VARIABLES PRINCIPALES QUE INFLUYEN EN EL FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DE BOMBEO .....	- 21 -
4.3.1	<i>Altura (h)</i> .....	- 21 -
4.3.2	<i>Altura atmosférica (h<sub>atm</sub>)</i> .....	- 21 -
4.3.3	<i>Altura (presión) Relativa</i> .....	- 21 -
4.3.4	<i>Altura (presión) Absoluta</i> .....	- 21 -
4.3.5	<i>Altura de pérdidas por fricción (h<sub>f</sub>)</i> .....	- 22 -
4.3.6	<i>Altura Estática:</i> .....	- 22 -
4.3.7	<i>Altura dinámica o de velocidad</i> .....	- 22 -
4.3.8	<i>Altura Total de una bomba (H)</i> .....	- 23 -
4.3.9	<i>Condiciones de succión de un sistema de bombeo</i> .....	- 23 -
4.3.10	<i>Potencia</i> .....	- 23 -
4.3.11	<i>Presiones en la bomba</i> .....	- 25 -
4.3.12	<i>Presión total</i> .....	- 25 -
4.3.13	<i>Velocidad específica N<sub>s</sub></i> .....	- 26 -
4.3.14	<i>Parámetros de la bomba</i> .....	- 28 -
4.4	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS .....	- 28 -

4.4.1	<i>Curva de altura total versus caudal de la bomba</i> .....	- 29 -
4.4.2	<i>Curva altura total versus caudal del sistema</i> .....	- 29 -
4.4.3	<i>Curva de potencia versus caudal</i> .....	- 33 -
4.4.4	<i>Curva de eficiencia total versus caudal</i> .....	- 34 -
4.4.5	<i>Curvas características H-Q combinadas – comportamiento de las bombas centrífugas</i> .....	- 35 -
4.4.6	<i>Curvas compuestas de un conjunto de bombas operando en paralelo</i> ...	- 36 -
4.4.7	<i>Curvas compuestas de un conjunto de bombas operando en serie</i> .....	- 38 -
4.5	<b>EFFECTOS DE LA PÉRDIDA DE EFICIENCIA EN BOMBAS CENTRÍFUGAS</b> .....	- 39 -
4.5.1	<i>Pérdidas hidráulicas <math>P_h</math> (Quirós Morales)</i> .....	- 39 -
4.5.2	<i>Pérdidas volumétricas <math>P_v</math> (Quirós Morales)</i> .....	- 40 -
4.5.3	<i>Pérdidas mecánicas <math>P_m</math> (Quirós Morales)</i> .....	- 40 -
4.5.4	<i>Eficiencia hidráulica <math>\eta_h</math></i> .....	- 41 -
4.5.5	<i>Eficiencia volumétrica <math>\eta_v</math></i> .....	- 41 -
4.5.6	<i>Eficiencia mecánica <math>\eta_m</math></i> .....	- 42 -
4.5.7	<i>Eficiencia total de la bomba</i> .....	- 42 -
4.5.8	<i>Eficiencia máxima alcanzable en una bomba centrífuga</i> .....	- 43 -
4.5.9	<i>Efectos de la velocidad específica ( (Karassik, Messina, Cooper, &amp; Heald, 2006) )</i> .....	- 43 -
4.5.10	<i>Consecuencias relacionadas con el punto de operación del sistema</i> ..	- 44 -
4.5.11	<i>Alteración de la forma de las curvas características ocasionada por el deterioro de las bombas centrífugas</i> .....	- 44 -
<b>5</b>	<b>CARACTERIZACIÓN Y PRUEBAS HIDRÁULICAS</b> .....	<b>- 51 -</b>
<b>6</b>	<b>DISEÑO METODOLÓGICO PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN SISTEMAS DE BOMBEO CON BOMBAS CENTRÍFUGAS – DESARROLLO DE UN CASO PRÁCTICO.</b> .....	<b>- 55 -</b>
6.1	GENERALIDADES .....	- 55 -
6.2	DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO ANALIZADA .....	- 55 -
6.3	PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LAS MEDICIONES EN EL SISTEMA ANALIZADO.....	- 60 -

<b>7</b>	<b>DESARROLLO DEL TRABAJO</b> .....	<b>- 61 -</b>
7.1	ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL .....	- 61 -
<b>8</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>- 66 -</b>
8.1.1	<i>Comportamiento del sistema operando con las bombas de manera individual</i> - 66 -	
8.1.2	<i>Comportamiento del sistema operando con dos bombas en paralelo</i> (Bombas 1 y 3).....	- 71 -
8.1.3	<i>Comportamiento del sistema operando con tres bombas en paralelo</i> (Bombas 1, 3 y 5).....	- 75 -
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>- 77 -</b>
9.1	DIFERENCIAS ENTRE LA CONDICIÓN DE DESEMPEÑO ORIGINAL Y ACTUAL DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO ANALIZADA .....	- 77 -
9.2	RECOMENDACIÓN DE LOS CAUDALES MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE OPERACIÓN DE LAS BOMBAS ANALIZADAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA Y EL CONSUMO ENERGÉTICO .....	- 78 -
9.3	RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE LAS BOMBAS ANALIZADAS Y DISMINUIR EL CONSUMO DE ENERGÍA.....	- 80 -
<b>10</b>	<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>- 83 -</b>
<b>11</b>	<b>ANEXO</b> .....	<b>- 86 -</b>
11.1	DATOS TOMADOS EN EL LABORATORIO DURANTE LAS PRUEBAS REALIZADAS EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD EAFIT LOS DÍAS 2 Y 3 DE DICIEMBRE DE 2021. - 86 -	

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Clasificación de las bombas centrífugas según (Hydraulic Institute ANSI/HI 14.1-14.2, 2019). Tomado de (Jiménez Mur., s.f.).*\_\_\_\_\_ - 17 -
- Figura 2: Corte esquemático de una bomba centrífuga: 1a carcasa o cuerpo de la bomba, 1b cámara de la bomba, 2 rodete o impulsor, 3 cajera del cierre del eje, 4 camisa del cierre del eje, 5 soporte y carcasa de rodamientos, 6 eje. Tomado de Wikipedia (Wikipedia, 2010).* \_\_\_\_\_ - 17 -
- Figura 3: Partes de una bomba Centrífuga.* \_\_\_\_\_ - 18 -
- Figura 4: Bomba centrífuga de flujo axial.* \_\_\_\_\_ - 19 -
- Figura 5: Bomba centrífuga de flujo mixto.* \_\_\_\_\_ - 20 -
- Figura 6: Bomba centrífuga de flujo radial.* \_\_\_\_\_ - 20 -
- Figura 7: Mediciones de presión atmosférica, presión absoluta y presión relativa.* \_ - 22 -
- Figura 8: Relación entre la velocidad específica y el tipo de bomba centrífuga. Unidades métricas ( $m^3/s$ , m.c.a, r.p.m). Tomado de (Soriano, 2011)*\_\_\_\_\_ - 27 -
- Figura 9: Curva característica altura total HB Vs Q Caudal de la bomba. En esta figura, el término caudal nominal se refiere al caudal correspondiente al punto de máxima eficiencia de la bomba.*\_\_\_\_\_ - 29 -
- Figura 10: Ejemplo conjunto de tuberías y tanques asociados a un sistema de bombeo. Elaboración propia.*\_\_\_\_\_ - 30 -
- Figura 11: Diagrama de Moody. Fuente: (Wikipedia® , 2020).*\_\_\_\_\_ - 31 -
- Figura 12: Curvas características del sistema H vs Q, para el caso de un bombeo con altura estática igual a cero. Elaboración Propia* \_\_\_\_\_ - 33 -
- Figura 13: Curvas de Potencia Vs Caudal, en función del tamaño*\_\_\_\_\_ - 34 -
- Figura 14: Curva eficiencia total Vs Caudal: Elaboración Propia.*\_\_\_\_\_ - 34 -
- Figura 15: Curvas características combinadas. Elaboración propia.* \_\_\_\_\_ - 35 -

<i>Figura 16: Curva H-Q inestable de una bomba. Elaboración propia.</i>	_____	- 37 -
<i>Figura 17: Curvas de una bomba operando individualmente y sistemas operando con dos y tres bombas de idénticas características operando en paralelo. Elaboración Propia.</i>	_____	- 38 -
<i>Figura 18: Curvas compuestas de un conjunto de bombas operando en serie. Elaboración Propia.</i>	_____	- 39 -
<i>Figura 19: Curvas de eficiencia para diferentes valores de velocidad específica.</i>	___	- 43 -
<i>Figura 20: Eficiencia de la bomba Vs velocidad específica y tamaño (Flowserve Corporation).</i>	_____	- 44 -
<i>Figura 21: Efecto del desgaste de la bomba sobre sus características. Tomado del Manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).</i>	_____	- 45 -
<i>Figura 22: Variación en el punto de funcionamiento de una bomba. Tomado del Manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).</i>	_____	- 47 -
<i>Figura 23: Punto de operación en el punto de eficiencia óptima en un sistema sin regulación. Tomado del Manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).</i>	_____	- 48 -
<i>Figura 24: Punto de operación de un sistema que funciona con una válvula en la descarga parcialmente cerrada. Tomado del Manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).</i>	_____	- 48 -
<i>Figura 25: Punto de operación de un sistema que funciona con una válvula en la descarga parcialmente cerrada. Tomado del Manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).</i>	_____	- 49 -
<i>Figura 26: Confiabilidad en función de la distancia con respecto al punto de eficiencia óptima (BEP). Tomada del Manual de optimización de sistemas de Bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).</i>	_____	- 50 -

*Figura 27: Imagen ilustrativa de un sistema de tuberías y tanques asociados a un sistema de bombeo. Elaboración propia. \_\_\_\_\_ - 53 -*

*Figura 28: Imagen esquemática de la estación de bombeo analizada. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT \_\_\_\_\_ - 56 -*

*Figura 29: Curva de desempeño de las bombas analizadas – Curvas del fabricante de las bombas. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT. \_\_\_\_\_ - 57 -*

*Figura 30: Anillo de succión de la estación de bombeo Analizada. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT. \_\_\_\_\_ - 57 -*

*Figura 31: Anillo de descarga de la estación de bombeo Analizada. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT. \_\_\_\_\_ - 58 -*

*Figura 32: Sistema Analizado. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT. \_\_\_\_\_ - 59 -*

*Figura 33: Sistema de tuberías conectado a la estación de bombeo. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT. \_\_\_\_\_ - 59 -*

*Figura 34: Curva de funcionamiento bombas analizadas superpuesta con las curvas de eficiencia del fabricante de la bomba. Información de la curva de funcionamiento de la bomba suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT. \_\_\_\_\_ - 62 -*

*Figura 35: Comportamiento de las bombas trabajando de manera individual – Caudales máximos recomendables de operación. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas. \_\_\_\_\_ - 67 -*

*Figura 36: Comportamiento de las bombas trabajando de manera individual – Caudales mínimos recomendables de operación. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas. \_\_\_\_\_ - 69 -*

*Figura 37: Comportamiento de las bombas trabajando de manera individual – comparación altura proporcionada por las bombas para el caudal del punto de máxima*

eficiencia (BEP). Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas. \_\_\_\_\_ - 70 -

Figura 38: Comportamiento de las Bombas 1 y 3 trabajando en paralelo – punto de funcionamiento y deterioro acelerado de las bombas. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas. \_\_\_\_\_ - 72 -

Figura 39: Comportamiento de las Bombas 1 y 3 trabajando en paralelo – punto de funcionamiento con alta eficiencia. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas. \_\_\_\_\_ - 73 -

Figura 40: Caudal del sistema para dos bombas trabajando en paralelo. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas. \_\_\_\_\_ - 74 -

Figura 41: comportamiento del sistema operando con tres bombas en paralelo y la válvula completamente abierta. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas. \_\_\_\_\_ - 75 -

Figura 42: Curva bombas originales operando en paralelo. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas. \_\_\_\_\_ - 80 -



## RESUMEN

El principal objetivo de este documento es presentar un análisis de la optimización energética que podría realizarse en una estación de bombeo que incluya bombas centrífugas. Se incluye un marco teórico con las definiciones más relevantes desde la clasificación de las bombas y conceptos normalmente utilizados en el diseño y operación de un sistema de bombeo. Se presentan también las curvas características con las que se representa el comportamiento de las bombas centrífugas y las causas que más influyen en las pérdidas de eficiencia de este tipo de bombas. Finalmente, se desarrolla un caso práctico donde se analiza una estación de bombeo con bombas centrífugas; para este análisis fueron realizadas algunas pruebas operando el sistema con las bombas de manera individual y en paralelo. En el desarrollo de este caso práctico se analizan las condiciones actuales de operación de las bombas y con los resultados obtenidos mediante la ejecución de algunas pruebas de desempeño, se identifican mejoras para operar este sistema con criterios de optimización energética, basados en las normas aplicables.

*Palabras clave:* Sistemas de bombeo, bombas centrífugas, optimización energética, punto de máxima eficiencia (BEP).

## 1 INTRODUCCIÓN

La optimización energética de un sistema de bombeo se refiere al análisis y estudio de un sistema de bombeo que utiliza bombas centrífugas, con el objeto de mejorar sustancialmente la eficiencia operativa del sistema, esto es, minimizar el consumo de energía, con el objeto de obtener una reducción significativa en los costos de operación (por consumo de energía), a la vez que se mejora el desempeño del equipo y se reducen los costos de mantenimiento.

En sistemas de bombeo existentes, es preciso llevar a cabo una adecuada caracterización hidráulica del sistema, con el objeto de lograr su optimización energética en la condición actual. La caracterización hidráulica del sistema se refiere al levantamiento de las curvas de desempeño hidráulico de los equipos y sistemas de tuberías, tendiente a establecer las diferencias entre la condición original del sistema de bombeo y la condición actual después de determinados años de trabajo, lo cual aportará argumentos para efectuar las recomendaciones del caso que facilitarán la respectiva toma de decisiones por parte del dueño del proyecto, fundamentado en sus propios criterios, como puede ser el análisis costo - beneficio.

El mejoramiento de la eficiencia energética de los sistemas de bombeo, además de reducir los costos por consumo de energía, trae como consecuencia otros beneficios de alto impacto para el sistema de bombeo, puesto que mientras más cerca del punto de máxima eficiencia de la bomba opere la unidad de bombeo, mayor durabilidad, es decir, mayor vida útil tendrán las piezas y componentes internos del equipo, con lo cual se disminuyen los respectivos costos de mantenimiento, se reduce la frecuencia de intervenciones para realizar mantenimientos correctivos, y se mejora sustancialmente el desempeño del sistema de bombeo.

Para realizar la optimización energética de un sistema de bombeo, será preciso incurrir en algunos costos, tanto para realizar los análisis, estudios, caracterizaciones y pruebas, como para realizar las reformas a los sistemas, en caso de que fuera necesario, de acuerdo con los resultados del análisis costo-beneficio que realice el propietario del proyecto, y de acuerdo con las diferentes alternativas de solución disponibles.

## 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se busca con este trabajo hacer una recopilación de las principales variables que influyen en el funcionamiento de sistemas de bombeo y cuáles de ellas son claves para aumentar la eficiencia de las unidades de bombeo, reducir los costos de operación y mantenimiento asociados y aumentar la vida útil de los equipos.

Lo anterior se aplica en el desarrollo de un caso práctico para mejorar la eficiencia y el desempeño, y disminuir el consumo energético de las unidades de bombeo de la estación de bombeo principal del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad EAFIT, sede Medellín. El desarrollo del caso práctico incluye la toma de datos reales del funcionamiento de las tres unidades de bombeo que se encuentran habilitadas y disponibles para realizar este estudio. Con esta información se hace un diagnóstico de las condiciones de funcionamiento del sistema de bombeo y los análisis que permiten identificar mejoras en los modos de operación enmarcadas dentro de los límites establecidos en las recomendaciones normativas, y en las recomendaciones de intervenciones que permitan aumentar su eficiencia y por ende disminuir su consumo de energía.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 GENERAL**

Analizar una estación de bombeo que utilice bombas centrífugas, con el propósito de aplicar los conceptos teóricos que sustentan el mejoramiento de la eficiencia y la disminución del consumo energético, a un caso práctico real, para plantear medidas correctivas recomendadas que permitan lograr dicho propósito, así como identificar los beneficios directos e indirectos para el sistema de bombeo analizado.

#### **3.2 ESPECÍFICOS**

Presentar un marco teórico en el que se expongan los principales conceptos, definiciones, y variables aplicables al caso del mejoramiento de la eficiencia de los sistemas de bombeo que utilizan bombas centrífugas.

Analizar un sistema de bombeo existente, para caracterizarlo hidráulicamente, medir las variables operativas que tienen influencia en el propósito de mejoramiento de la eficiencia del equipo, y establecer las curvas de desempeño (curvas H-Q) actuales.

Establecer diferencias entre la condición original de desempeño prevista por las curvas originales del fabricante de las unidades de bombeo (curvas de catálogo), y compararla con la condición actual de trabajo de las unidades de bombeo de la estación de bombeo objeto de análisis, después de un tiempo de funcionamiento. A partir de esta comparación indicar las implicaciones más relevantes en el desempeño de las unidades, que pueden representar las diferencias encontradas.

Plantear mejoras en cuanto a los caudales mínimos y máximos de operación recomendados por las normas internacionales, que permiten mejorar la eficiencia, y el consumo energético de las bombas analizadas, a la vez que se mejora su desempeño.

Establecer conclusiones y recomendaciones para mejorar la eficiencia de las bombas y disminuir el consumo de energía, tanto para el modo de operación de las bombas de manera individual y en paralelo (dos o tres bombas en paralelo).

## 4 MARCO TEÓRICO

### 4.1 DEFINICIONES BÁSICAS

En la siguiente tabla se presentan los términos y símbolos a los que se hará referencia durante el desarrollo de este documento, los cuales se han basado en las definiciones que presentan las normas del Instituto de Hidráulica de Los Estados Unidos de América (Hydraulic Institute ANSI/HI 14.1-14.2, 2019).

*Tabla 1: definiciones básicas – (Rotodynamic Pumps for Nomenclature and Definitions (ANSI/HI 14.1-14.2-2019), pág. 88)*

Símbolo	Término	Unidad de medida	Abreviatura
<b>A</b>	Área	metros cuadrados	$m^2$
<b>BEP</b>	Punto de máxima eficiencia (Best efficiency point)	Definido por las coordenadas de un punto H (m.c.a) y Q ( $m^3/s$ )	$m^3 / s$
<b>D</b>	Diámetro	metros	$m$
<b>E</b>	Energía	Joules	$J$
<b>F</b>	Fuerza	newton	$N$
<b>g</b>	Aceleración de la gravedad	metro/segundo cuadrado	$m / s^2$
<b>H</b>	Altura total	Metros de columna de líquido	m.c.líquido*
<b>h</b>	Altura de presión ( $h=P/r.g$ )	metros	m.c.líquido
<b>n</b>	Velocidad de rotación	revoluciones/minuto	$rpm$
<b>NPSH</b>	Altura neta positiva de succión (Net Positive Suction Head)	metros	m.c.líquido
<b>NPSHD</b>	Altura neta positiva de succión disponible (Net Positive Suction Head Available - NPSHA)	metros	m.c.líquido
<b>NPSHR</b>	Altura neta positiva de succión requerida	metros	$m$
<b>Ns</b>	Velocidad específica	$[rpm.(m^3/s)^{1/2}]/[m.c.a^{3/4}]^{**}$	
<b>S (Nss)</b>	Velocidad específica de succión	$[rpm.(m^3/s)^{1/2}]/[m.c.a^{3/4}]^{**}$	
<b>Pa</b>	Potencia de accionamiento	Kilovatios	KW

Símbolo	Término	Unidad de medida	Abreviatura
$P_{mot}$	Potencia eléctrica de entrada del motor	Kilovatios	KW
$P_b$	Potencia de entrada de la bomba o potencia de accionamiento	Kilovatios	KW
$P_w$	Potencia de salida de la bomba o potencia de accionamiento	Kilovatios	KW
$\eta$	Eficiencia total de la bomba	Porcentaje	%
$\eta_v$	Eficiencia volumétrica	Porcentaje	%
$\eta_m$	Eficiencia mecánica	Porcentaje	%
$\eta_h$	Eficiencia hidráulica	Porcentaje	%

\*m.c.líquido: metros de columna del líquido bombeado. Frecuentemente se utiliza m.c.a. (metros de columna de agua).

\*\*Frecuentemente se utilizan las unidades del sistema inglés:  $[\text{rpm} \cdot (\text{gpm})^{1/2}] / [\text{pies.c.a}^{3/4}]$ .

Donde pies.c.a significa pies de columna de agua y gpm, galones por minuto.

## 4.2 CONCEPTOS RELACIONADOS CON SISTEMAS DE BOMBEO

A continuación, se definen los principales conceptos relacionados con la eficiencia energética en aplicaciones en sistemas de bombeo.

### 4.2.1 Clasificación de las Bombas

Las bombas pueden ser clasificadas teniendo en cuenta sus aplicaciones, materiales de los que están fabricadas, el líquido bombeado e incluso su orientación en el espacio. Todas estas clasificaciones tienen un alcance limitado y tienden a superponerse. Todas las bombas se pueden dividir en dos categorías principales (Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2006):

- a) Bombas dinámicas, en las que se agrega energía continuamente para aumentar las velocidades del fluido al interior de la máquina a valores mayores a los que se presentan en la descarga, de modo que la reducción de la velocidad que ocurre dentro o más allá de la bomba, produce un aumento de la presión.

- b) Bombas de desplazamiento, en las que la energía es adicionada de forma periódica mediante la aplicación de fuerza en uno o más límites móviles de cualquier número deseado de volúmenes cerrados que contienen fluido, lo que resulta en un aumento directo en la presión hasta alcanzar el valor requerido para mover el fluido a través de válvulas o puertos localizados en la línea de descarga. En este caso, el aumento en la presión del fluido se logra mediante la aplicación de principios de la hidrostática. Este tipo de bombas también se conocen con el nombre de bombas de desplazamiento positivo.

Las bombas dinámicas pueden subdividirse en varias categorías, como son las bombas centrífugas y las bombas de efectos especiales (Figura 1). Las bombas de desplazamiento se dividen principalmente en tipos alternativos y rotativos, dependiendo de la naturaleza del movimiento de los elementos que generan la presión.

#### **4.2.2 Bomba hidráulica**

Según (Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2006), una bomba hidráulica es una máquina de fluido en la que el fluido es el receptor de la energía impartida por el motor de accionamiento. Es, por lo tanto, una máquina generadora; en éstas el fluido que intercambia su energía no varía sensiblemente de densidad en su paso a través de la máquina, por lo cual, en el diseño y estudio de la misma, se hace la hipótesis de que la densidad del fluido es constante, es decir, el fluido es incompresible.

#### **4.2.3 Bomba centrífuga o rotodinámica**

Las bombas rotodinámicas o centrífugas son máquinas cinéticas en las que la energía es continuamente transmitida al fluido bombeado a través de un elemento rotativo llamado impulsor o rodete. Las bombas rotodinámicas o centrífugas hacen parte de las llamadas turbomáquinas. Estas bombas transmiten energía mecánica al fluido principalmente aumentando la energía cinética del fluido. Posteriormente la energía cinética se convierte en energía potencial (presión) en la descarga de la bomba. (Hydraulic Institute ANSI/HI 14.1-14.2, 2019).

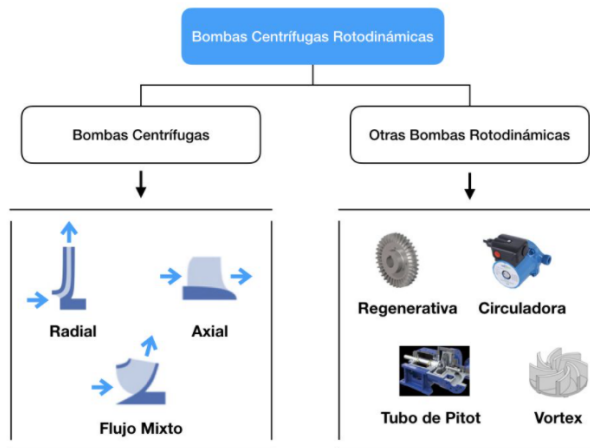


Figura 1: Clasificación de las bombas centrífugas según (Hydraulic Institute ANSI/HI 14.1-14.2, 2019). Tomado de (Jiménez Mur., s.f.).

A continuación, en la Figura 2 se indica un corte esquemático de una bomba centrífuga y en la Figura 3 se indican las principales partes de una bomba centrífuga.

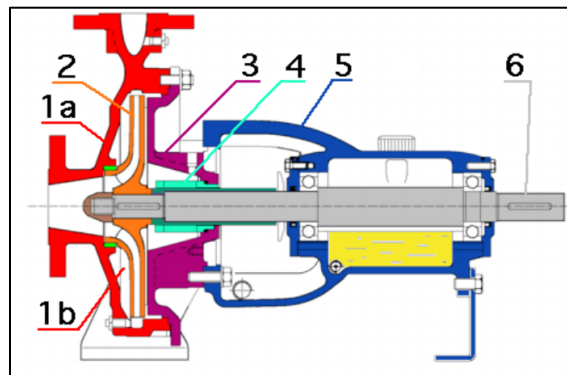


Figura 2: Corte esquemático de una bomba centrífuga: 1a carcasa o cuerpo de la bomba, 1b cámara de la bomba, 2 rodete o impulsor, 3 cajera del cierre del eje, 4 camisa del cierre del eje, 5 soporte y carcasa de rodamientos, 6 eje. Tomado de Wikipedia (Wikipedia, 2010).

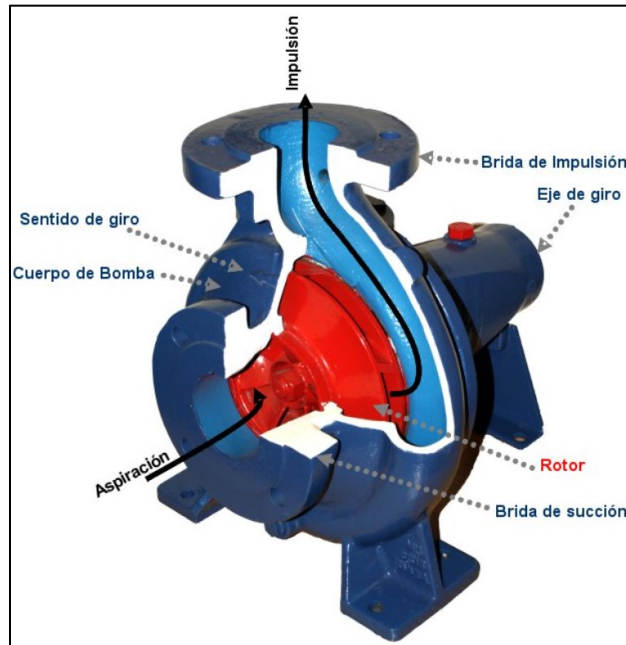
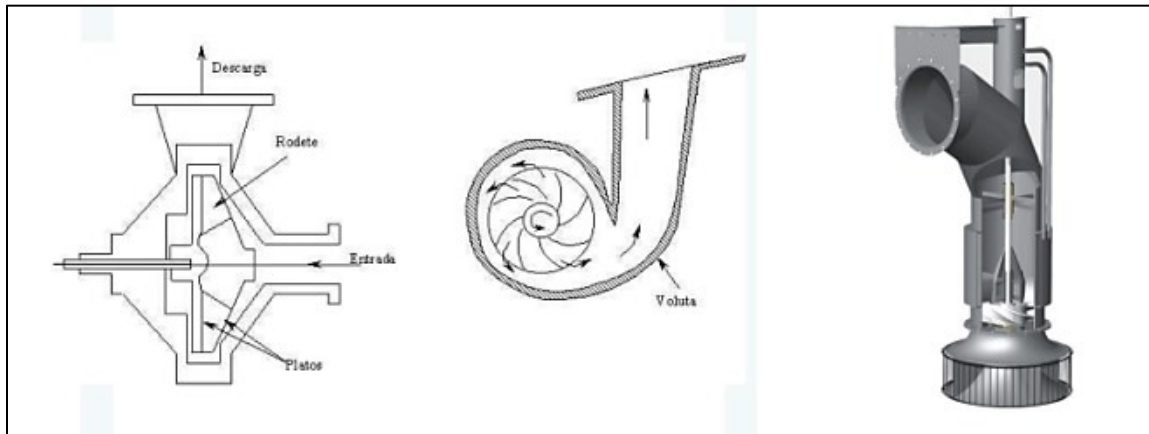


Figura 3: Partes de una bomba Centrífuga.  
Tomado de (Wikipedia, 2008).

Las bombas centrífugas a su vez, de acuerdo con la dirección del flujo en el rodete, se clasifican en:

#### **4.2.3.1 Bombas centrífugas de flujo axial**

Una bomba de flujo axial tiene un impulsor de una sola entrada, el flujo entra y descarga axialmente, es decir, la dirección del flujo a su paso por el rodete o impulsor es paralela al eje de rotación. Los impulsores de este tipo son llamados hélices (o propellers, que corresponde al término en inglés) y no tienen cubiertas (shrouds). Los impulsores de flujo axial se usan típicamente para aplicaciones con bombas de una sola etapa y con necesidad de bombear fluido a una baja altura. Las bombas de este tipo usualmente tienen una velocidad específica aproximada superior a 200 (10.000 en sistema métrico). (Hydraulic Institute ANSI/HI 14.1-14.2, 2019). En este tipo de bombas, la velocidad absoluta del fluido, en ningún punto de la superficie de los álabes tiene componente radial. Es decir, el flujo entre la entrada y la salida del álabe solo tiene componentes axial y tangencial. (Quirós Morales). Ver Figura 4.



*Figura 4: Bomba centrífuga de flujo axial.  
Tomada de (Saba).*

#### **4.2.3.2 Bombas centrífugas de flujo mixto**

Las bombas de flujo mixto tienen un impulsor de una sola entrada, el flujo entra de forma axialmente y descarga con un ángulo de  $45^\circ$  aproximadamente, formado con el eje de rotación del impulsor. Las bombas de este tipo suelen tener una velocidad específica entre aproximadamente 90 (4500 en sistema métrico) y 200 (10.000 en sistema métrico) y pueden manejar líquidos con sólidos en suspensión. Los impulsores de este tipo son semiabiertos o cerrados. (Hydraulic Institute ANSI/HI 14.1-14.2, 2019). La velocidad absoluta en las bombas de flujo mixto tiene, a su paso a través de los álabes, las tres componentes: radial, axial y tangencial. (Quirós Morales). Estas bombas se utilizan para alturas y caudales intermedios, el impulsor es más ancho que los de flujo radial y los alabes adquieren una doble curvatura, torciéndose en el extremo de la succión, tal como se muestra en la Figura 5.

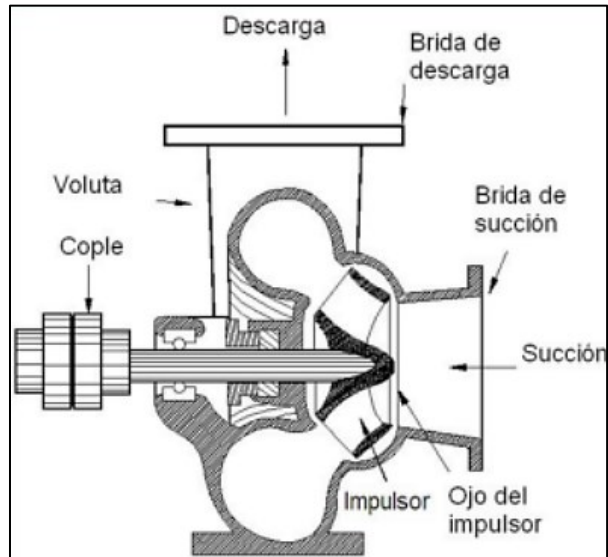


Figura 5: Bomba centrífuga de flujo mixto.  
Tomada de (Bomba centrífuga)

#### 4.2.3.3 Bombas centrífugas de flujo radial

El movimiento del fluido se inicia en un plano paralelo al eje de giro del impulsor de la bomba y termina en un plano perpendicular a éste. Estas bombas pueden ser horizontales o verticales. Tomado de (Vazquez Bedolla, González Lozano, Gómez Badillo, Ciprés Esquivel, & Romero Gutierrez). En la Figura 6 se presentan imágenes de bombas centrífugas de flujo radial.

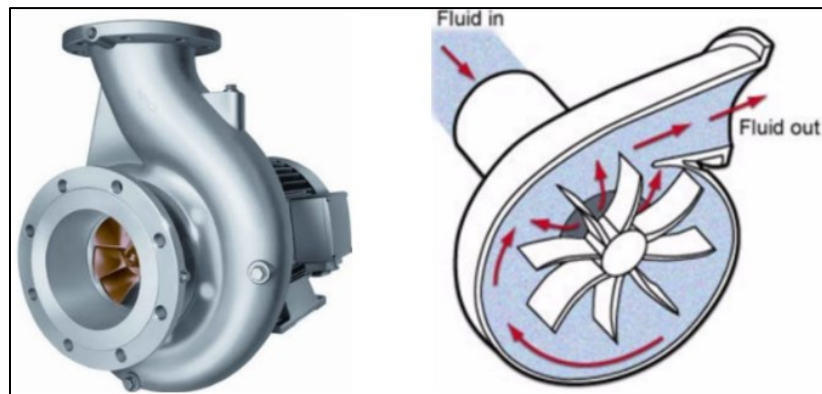


Figura 6: Bomba centrífuga de flujo radial.  
Tomada de (Vazquez Bedolla, González Lozano, Gómez Badillo, Ciprés Esquivel, & Romero Gutierrez)

### **4.3 VARIABLES PRINCIPALES QUE INFLUYEN EN EL FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DE BOMBEO**

#### **4.3.1 Altura ( $h$ )**

Es la expresión del contenido de energía de un líquido con respecto a cualquier nivel de referencia arbitrario. Se expresa en unidades de energía por unidad de peso del líquido. La unidad de medida para la altura son los metros de columna de líquido. También se utiliza la expresión de “altura de presión”.

#### **4.3.2 Altura atmosférica ( $h_{atm}$ )**

Es la presión atmosférica local expresada en metros de columna de líquido. El valor de la presión atmosférica varía con las condiciones atmosféricas (clima), temperatura y altura del lugar. El valor de la presión atmosférica en condiciones normales al nivel del mar es 1 atmósfera =  $1,033 \text{ kg/cm}^2 = 10,33 \text{ m.c.a.}$  (Bombas Zeda Pump Manufacturer, s.f.)

#### **4.3.3 Altura (presión) Relativa**

Es la medida de altura o presión manométrica, indica la presión relativa, con respecto a la presión atmosférica local. Los manómetros o vacuómetros miden presiones relativas. (Bombas Zeda Pump Manufacturer, s.f.)

#### **4.3.4 Altura (presión) Absoluta**

Es la medida de presión con respecto al cero absoluto. El valor de la altura de presión absoluta es la suma de la altura de presión atmosférica ( $h_{atm}$ ) con la altura (presión) relativa o presión manométrica. El valor de la presión absoluta estará representado siempre por un número positivo. El instrumento de medición para obtener la presión absoluta es el barómetro.

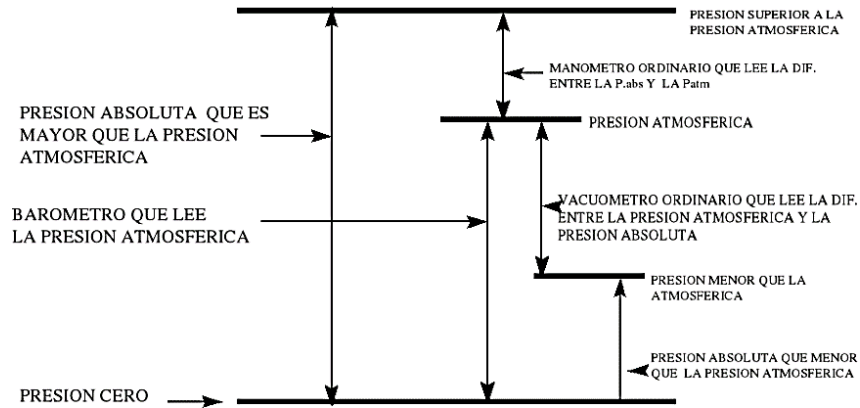


Figura 7: Mediciones de presión atmosférica, presión absoluta y presión relativa.

#### 4.3.5 Altura de pérdidas por fricción ( $h_f$ )

Es la energía hidráulica que pierde el flujo de un fluido, debido a la fuerza de fricción asociada al efecto de la viscosidad en un sistema de tuberías. Se expresa en metros de columna de líquido.

#### 4.3.6 Altura Estática:

Es la altura en metros de columna de líquido que expresa la presión que tiene un fluido en un determinado punto de la corriente, sin considerar los efectos de la velocidad de flujo. Este término se encuentra con la siguiente fórmula:

$$\text{Altura Estática} = P/\rho g$$

Donde, (1)

$P$ : presión estática

#### 4.3.7 Altura dinámica o de velocidad

Es la altura en metros de columna de líquido que expresa la presión ejercida por la dinámica de la corriente, o por la velocidad de la corriente en un punto del fluido. Este término se encuentra con la siguiente fórmula:

$$\text{Altura dinámica} = V^2/2g \quad (2)$$

### **4.3.8 Altura Total de una bomba (H)**

Es la altura en metros de columna de líquido que debe entregar una bomba para elevar un fluido a un nivel deseado y vencer las restricciones impuestas por la fricción hidráulica y por la presión hidrostática.

### **4.3.9 Condiciones de succión de un sistema de bombeo**

#### ***4.3.9.1 Succión sumergida***

Una succión sumergida existe cuando la totalidad de la entrada del líquido a través de la succión se encuentra por debajo del nivel del líquido contenido en el tanque de almacenamiento o tanque de succión, cuando el líquido se encuentra sometido a presión atmosférica.

#### ***4.3.9.2 Cavitación***

El término cavitación define el fenómeno que incluye la formación y siguiente explosión de diminutas burbujas o bolsas de aire, gas o vapor en el seno de un fluido incompresible, debido a la acción dinámica del fluido. Para que inicie este fenómeno, la presión en el lugar deber ser igual o menor que la presión de vapor del líquido, y las burbujas o bolsas, llamadas cavidades, deben encontrar una región de presión estática más alta que la presión de vapor, para que imploten. (Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2006).

#### ***4.3.9.3 Altura neta positiva de succión (NPSH: Net Positive Suction Head)***

La altura neta positiva de succión es la altura total absoluta en la entrada de la bomba por encima de la altura de la presión de vapor asociada a la temperatura correspondiente del líquido. Esta variable influye en los análisis para determinar si una bomba presentará o no el fenómeno de cavitación bajo determinadas condiciones de operación. El análisis de este fenómeno no hace parte del alcance de este trabajo, por lo que no se presentarán mayores detalles respecto a este fenómeno.

### **4.3.10 Potencia**

#### ***4.3.10.1 Potencia eléctrica de entrada del motor ( $P_{mot}$ )***

La potencia eléctrica suministrada al motor por la red eléctrica, medida en kW.

#### **4.3.10.2 Potencia de entrada de la bomba ( $P_b$ ) o potencia de accionamiento**

La potencia requerida para accionar el ensamble completo de la bomba y vencer las pérdidas hidráulicas (pérdidas por fricción al interior de la bomba), las pérdidas volumétricas (fugas de líquido y recirculación de flujo en su interior) y las pérdidas mecánicas (fricción entre los componentes internos de la bomba que están en contacto y en movimiento relativo, como es el caso de los sellos mecánicos, prensaestopas y anillos de desgaste).

#### **4.3.10.3 Potencia de salida de la bomba ( $P_w$ ) o Potencia hidráulica**

La potencia entregada al líquido por la bomba, es también llamada potencia hidráulica de la bomba. Es la potencia que tiene el flujo producido por la bomba en la brida de salida.

$$[(P_w)] [kW] = QH\rho g / 1000 \quad (3)$$

Donde,

$$Q [m^3 / s]; H [m]; \rho [kg / m^3 ]; g = 9,81 [m / s^2 ]$$

#### **4.3.10.4 Eficiencia total ( $\eta_T$ ) del conjunto motor-bomba**

Esta eficiencia es la relación entre la energía entregada al líquido por la bomba  $[(P_w)]$  y la potencia eléctrica de entrada del motor ( $P_{mot}$ ).

$$\eta_T = (P_w) / P_{mot} \times 100 \quad (4)$$

#### **4.3.10.5 Eficiencia total de la bomba ( $\eta_b$ )**

O simplemente, eficiencia de la bomba, es la relación entre la energía entregada al líquido por la bomba ( $P_w$ ) y de la potencia de entrada de la bomba  $P_b$ ; esto es, la relación entre la potencia hidráulica de la bomba y la potencia de freno, expresada como un porcentaje.

$$\eta_b = P_w / P_b \times 100 \quad (5)$$

### **4.3.11 Presiones en la bomba**

#### **4.3.11.1 *Presión de trabajo***

Es la presión que desarrolla la bomba cuando entrega un determinado caudal de operación. Corresponde a la presión del punto de corte entre la curva H-Q de la bomba y la curva H-Q del sistema.

#### **4.3.11.2 *Presión de trabajo máxima permisible***

Es la presión de trabajo máxima permisible por el fabricante que diseñó la bomba o cualquier parte a la que se refiera, al operar con el fluido a la temperatura máxima especificada. La presión de trabajo máxima permisible en la carcasa en el lado de la succión puede ser diferente a la del lado de la descarga.

#### **4.3.11.3 *Presión nominal de descarga***

Se refiere a la presión de la bomba en su brida de descarga con condiciones nominales tales como flujo, velocidad, presión de succión y densidad del líquido. Corresponde a la presión desarrollada en la descarga de la bomba para el punto de máxima eficiencia de la bomba.

#### **4.3.11.4 *Presión estática***

Para aplicaciones de transvase de agua entre dos tanques abiertos a la atmósfera, es la diferencia de niveles del agua entre el tanque de succión y el tanque de descarga.

#### **4.3.11.5 *Presión dinámica***

Esta componente de la presión se evidencia solamente en fluidos en movimiento, pues está definida como la energía cinética del flujo, expresada en unidades de presión ( $P_d = \rho \cdot V^2/2$ ).

### **4.3.12 Presión total**

Es la sumatoria de los componentes de la presión, tanto estática como dinámica del flujo en un determinado punto de la corriente.

### 4.3.13 Velocidad específica Ns

Velocidad específica es un parámetro indicativo del comportamiento de una bomba para el caudal que representa el punto de máxima eficiencia, con el mayor diámetro del impulsor y con una velocidad rotativa conocida. (Hydraulic Institute ANSI/HI 14.1-14.2, 2019).

$$ns = (n(Q)^{0,5})/(H)^{0,75} \quad (6)$$

Donde,

$ns$  ( $N_s$ ) = Velocidad específica

$n$  = Velocidad rotativa [rev/min]

$Q$  = Caudal total de la bomba [gal/min]

$H$  = Altura de cada etapa de la bomba [ft]

Algunos autores representan la velocidad específica Ns (o ns), mediante la sigla Nq, o bien, nq, sin que exista diferencia en la definición o en la fórmula utilizada.

El uso de la velocidad específica se ha difundido a nivel mundial en unidades inglesas [rpm, gpm, pies]. Para obtener el valor en unidades métricas, se debe dividir la velocidad específica en unidades inglesas por 51,6.

Los valores de la velocidad específica en unidades métricas suelen variar entre 10 y 300 (500 a 15000 en unidades inglesas). Cuanto más pequeño sea el valor, más “radial” será la bomba (es decir, mayor altura y menor caudal) y cuanto mayor sea la velocidad específica, más “axial” será (es decir, menor altura y mayor caudal); esto está relacionado con la forma del rodete en cada caso. Otros parámetros afectados por el valor de la velocidad específica son la forma de las curvas características de la bomba y el máximo rendimiento que se pueda conseguir. (Universidad de Valencia - Laboratorio de Operaciones Básicas en Procesos Biotecnológicos). Las bombas radiales son el tipo de bombas más utilizadas, y en ese caso la velocidad específica está comprendida entre 10 y 60, en unidades métricas (500 y 3000, en unidades inglesas), entrando levemente el rango de las bombas de flujo mixto.

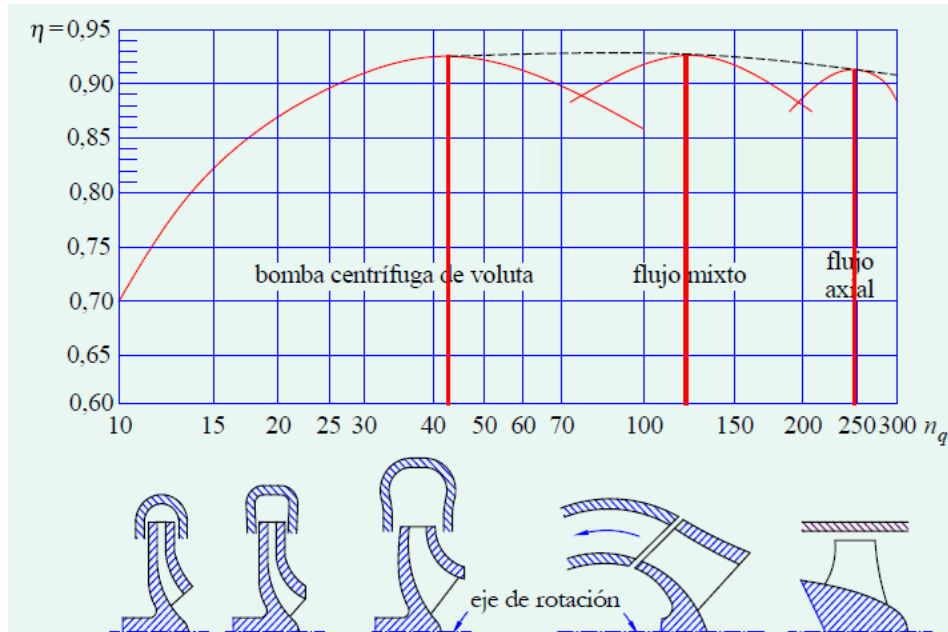


Figura 8: Relación entre la velocidad específica y el tipo de bomba centrífuga. Unidades métricas ( $m^3/s$ , m.c.a, r.p.m). Tomado de (Soriano, 2011)

En la Figura 8 se relaciona el tipo de bomba, la eficiencia total y la velocidad específica, nombrada en dicha imagen por  $n_q$  en unidades métricas. Como referencia general, se puede hablar de bomba centrífuga radial, cuando la velocidad específica está en el rango de 500 a 3000 aproximadamente, de flujo mixto con velocidades específicas en el rango de 3000 a 5000 y axial, cuando la velocidad específica va de 5000 a 15000 o más. Como se ha indicado, la clasificación en bombas de tipo radial, axial o mixto, se refiere a la dirección del flujo patrón del líquido a través de la bomba, de tal manera que en el impulsor radial el líquido fluye hacia afuera desde el centro del mismo, en los impulsores axiales el flujo se desplaza a lo largo del eje de rotación, en los de flujo mixto el movimiento lo hace en forma dual, es decir, radial y axial a través del impulsor.

La velocidad específica se utiliza solo como un número indicativo que determina y clasifica impulsores de geometría semejante. Dos impulsores geoméricamente semejantes tienen la misma velocidad específica  $N_s$ .

De acuerdo con lo anterior, para un mismo impulsor, la velocidad específica no cambia con la variación de la velocidad del mismo. Para impulsores similares, la velocidad específica es constante en diferentes velocidades y tamaños de impulsores.

#### **4.3.14 Parámetros de la bomba**

##### **4.3.14.1 Caudal máximo permisible**

El caudal máximo permisible es el caudal más alto al que puede operar la bomba continuamente sin comprometer significativamente su integridad mecánica, es decir, dentro de las condiciones aceptables de vibración, ruido y confiabilidad. Este valor depende también de la velocidad de operación y del líquido específico bombeado.

##### **4.3.14.2 Velocidad de rotación ( $n$ )**

La velocidad de rotación de una bomba es el número de rotaciones por unidad de tiempo. Generalmente el valor de la velocidad de rotación se expresa en rpm (revoluciones por minuto).

#### **4.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS**

Las curvas características de las bombas son las curvas que describen el comportamiento de la bomba frente a las variaciones de los principales parámetros que las caracterizan, como son la altura total (o presión total), la potencia de accionamiento, la eficiencia, y la NPSH. En general, las curvas características presentan siempre la variación de estos parámetros con respecto al caudal entregado por la bomba. En las curvas presentadas a continuación, se incluye, además de las curvas típicas de comportamiento de las bombas, un rango de operación recomendado por (Hydraulic Institute (ANSI/HI 14.1-14.2), 2019) por (Hydraulic Institute ANSI/HI 14.1-14.2, 2019), definido por un caudal mínimo, valor que corresponde al 30% del caudal nominal de la bomba, y un caudal máximo equivalente a un 20% por encima del caudal nominal de la bomba. El caudal nominal se refiere al caudal correspondiente al punto de máxima eficiencia de la bomba (BEP). De acuerdo con lo indicado en esta norma, operar por fuera del rango indicado del -30% a +20% llevará a una disminución drástica de la eficiencia de la bomba y a su acelerado deterioro.

#### 4.4.1 Curva de altura total versus caudal de la bomba

Estas curvas representan el comportamiento de las bombas, para diferentes combinaciones de caudal y altura de la bomba. A modo de ejemplo, en la Figura 9 se encuentran representadas las curvas características de tres referencias de bombas centrífugas de marca KSB con caudal nominal de 200 l/s y alturas de bombeo entre 75 m y 90 m : (Omega 200-520 B GB P F, ETANOMR RG 250-500 y MULTITEC C 200/ 2-14.2 11.167)

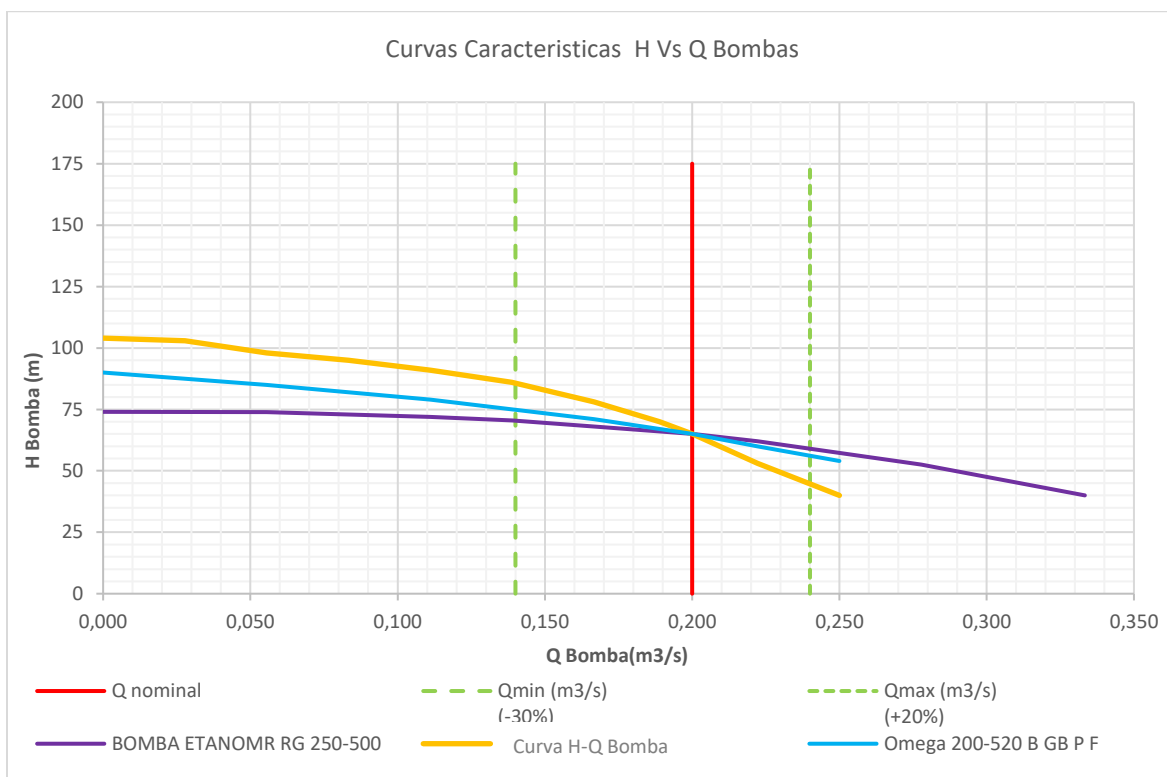


Figura 9: Curva característica altura total HB Vs Q Caudal de la bomba. En esta figura, el término caudal nominal se refiere al caudal correspondiente al punto de máxima eficiencia de la bomba.  
Elaboración propia.

#### 4.4.2 Curva altura total versus caudal del sistema

Los sistemas de tanques y tuberías para los cuales se suelen usar equipos de bombeo que permiten llevar un fluido desde un nivel inferior para unas condiciones de operación dadas son similares al que se muestra a continuación en la Figura 10. Generalmente

estos sistemas están compuestos por tuberías, válvulas, accesorios y otros conductos o equipos a través de los cuales fluye el líquido.

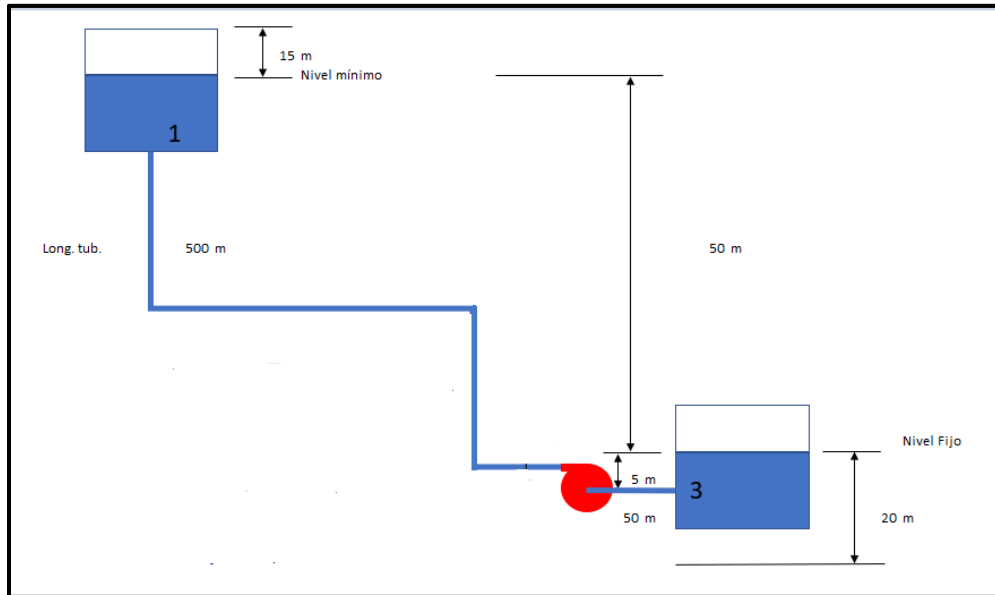


Figura 10: Ejemplo conjunto de tuberías y tanques asociados a un sistema de bombeo. Elaboración propia.

La curva que representa la altura total y el caudal requerido por el conjunto de tuberías asociado al sistema de bombeo relaciona la altura estática y las pérdidas que deben vencer las unidades de bombeo.

La ecuación que rige el comportamiento de la curva del sistema se obtiene al aplicar la ecuación de Bernoulli entre la superficie del agua en el tanque de succión y la superficie del agua en el tanque de descarga. (Ver Figura 10). La ecuación resultante es la (7), que se muestra a continuación:

$$H = Z + KQ^2 \quad (7)$$

Donde,

*K*: coeficiente de resistencia al flujo del sistema de tuberías. Este coeficiente tiene en cuenta a su vez los coeficientes de resistencia al flujo de los tramos rectos ( $f.L/D$ ) y de los diferentes accesorios hidráulicos tales como codos, tees, reducciones, válvulas, etc.

Para los tramos rectos, *D* es el diámetro interior de la tubería o tramo recto, *L* es su longitud, y *f* es el coeficiente de fricción de la tubería, el cual se obtiene del diagrama de Moody (ver Figura 11), en función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa de la tubería.

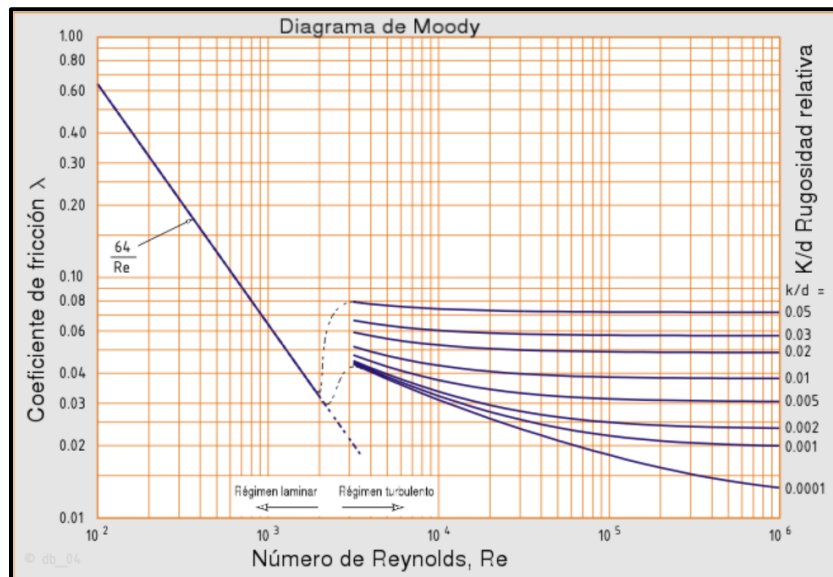


Figura 11: Diagrama de Moody. Fuente: (Wikipedia®, 2020).

El número de Reynolds se define por la siguiente relación:

$$Re = DV/\vartheta \quad (8)$$

Donde,

*D*: es el diámetro interior de la tubería

*V*: es la velocidad de flujo

$\nu$ : la viscosidad cinemática del fluido (m<sup>2</sup>/s). La rugosidad relativa es la relación entre la rugosidad absoluta del material de la tubería y su diámetro interior.

La curva característica que representa un sistema como el que se muestra en la Figura 10, se muestra a continuación en la Figura 12, para el caso particular en el que la altura estática es igual a cero.

Para determinar la capacidad de la instalación o de la estación de bombeo, es indispensable contar con la información de la demanda del sistema, y esto normalmente es plasmado en la curva característica como la indicada en la Figura 12, que incluye también las pérdidas de altura ocasionados por los elementos que hacen parte del sistema

Cuando se analiza un sistema en particular, con el propósito de seleccionar una bomba o un grupo de bombas, se debe calcular con precisión la resistencia al flujo que presente el sistema completo a través de sus varios componentes. Observando la Figura 10 y asumiendo que las cotas estáticas de altura para el sistema no varían, se determina cual sería el comportamiento del sistema para los mismos diámetros de tubería variando el caudal. Al calcular las pérdidas por fricción y por accesorios se encuentra que la relación general para las pérdidas  $H_f$  está en función de la altura de velocidad  $V^2/2g$  como se indica en la ecuación (2), ósea que  $H_f = f(V^2/2g)$ .

Las pérdidas varían con el cuadrado de la velocidad en la tubería o en su defecto con el cuadrado del caudal. Como se quiere construir la curva  $H$  Vs  $Q$ , se tendrá que variar el caudal  $Q$  para encontrar diferentes valores de altura  $H$ ; esto implicaría para cada cambio de caudal, calcular las pérdidas respectivas.

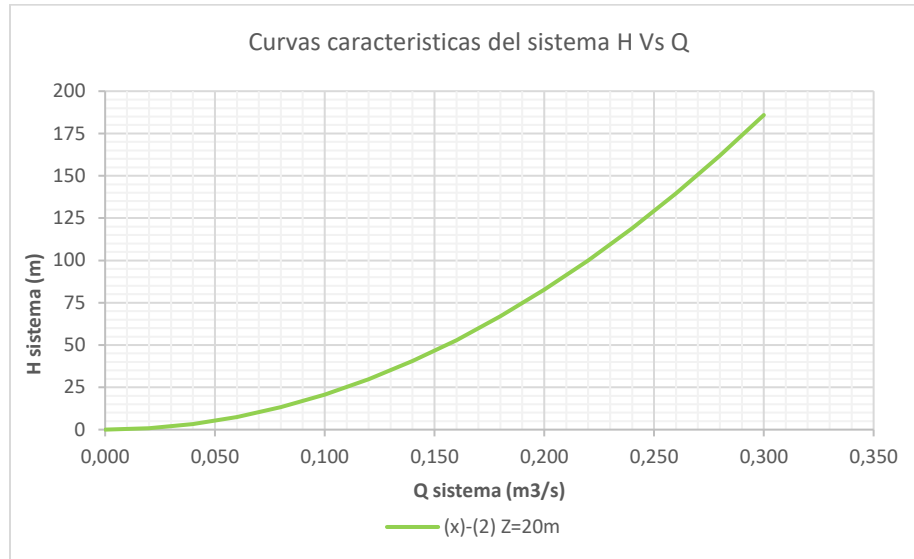


Figura 12: Curvas características del sistema H vs Q, para el caso de un bombeo con altura estática igual a cero. Elaboración Propia

#### 4.4.3 Curva de potencia versus caudal

En la Figura 13 se muestra el comportamiento típico de las curvas de potencia de accionamiento comparado con el caudal descargado por la bomba, para varios tamaños de bomba, característica que se relaciona directamente con la velocidad específica del equipo de bombeo. Esta figura indica que la demanda de potencia en el punto de corte o “shutoff”, que es el punto donde la bomba opera sin flujo, es decir con la válvula de descarga completamente cerrada, se incrementará con el aumento de la velocidad específica. Las bombas que requieren menor potencia en el punto de “shutoff”, que los que requieren en condiciones de flujo normales, son bombas de baja velocidad específica (en general bombas de tipo radial) y generalmente tienen un procedimiento de arranque con la válvula de descarga cerrada.

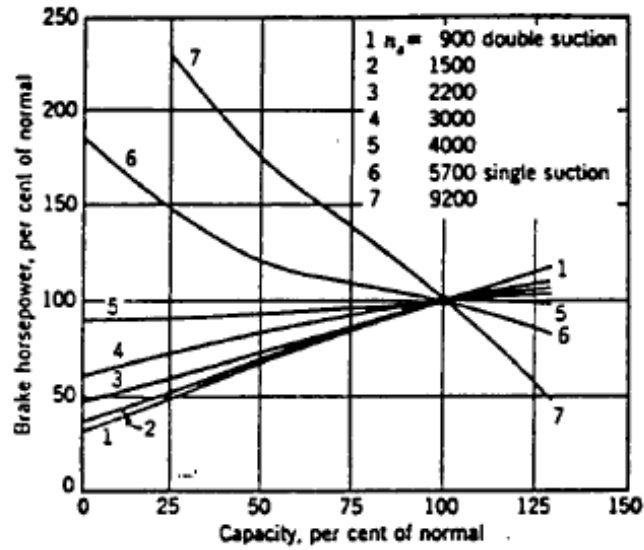


Figura 13: Curvas de Potencia Vs Caudal, en función del tamaño de la bomba (velocidad específica). Tomada de (Quirós Morales).

#### 4.4.4 Curva de eficiencia total versus caudal

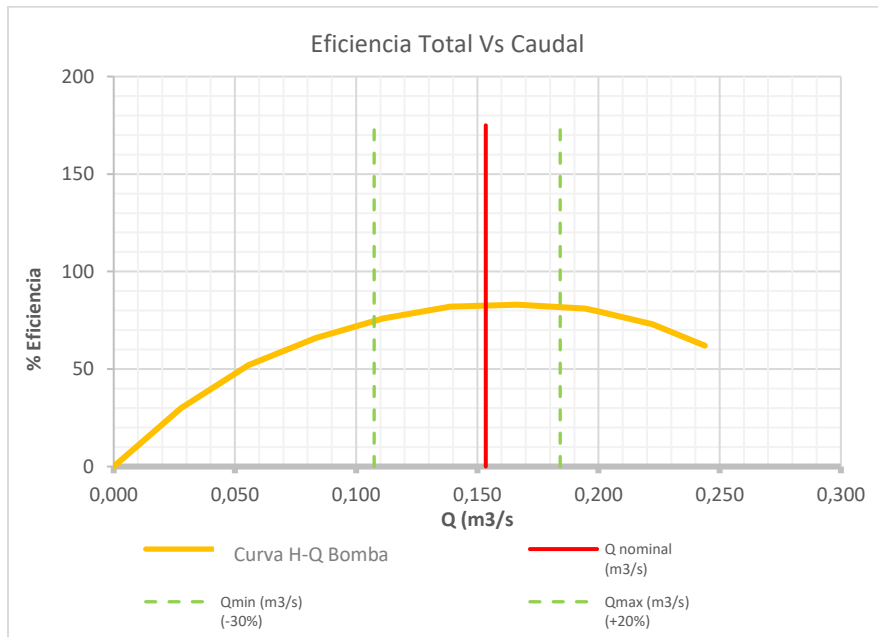


Figura 14: Curva eficiencia total Vs Caudal: Elaboración Propia.

Como se observa en la Figura 14, la curva de eficiencia vs caudal de una bomba centrífuga asciende desde cero caudal hasta el caudal de diseño de la bomba (es decir, hasta el caudal nominal), y a partir de ese punto se presenta el descenso gradual de la eficiencia con el aumento de caudal. El punto máximo corresponde al punto de máxima eficiencia de la bomba.

#### 4.4.5 Curvas características H-Q combinadas – comportamiento de las bombas centrífugas

En la Figura 15 se presentan las curvas características H-Q de un sistema de bombeo. En esta figura se presenta tanto la curva H-Q de la bomba como la curva H-Q del sistema de tuberías. El punto de corte entre estas dos curvas representa el punto de trabajo (punto operativo) del sistema de bombeo. Si se asume que el punto de corte entre estas dos curvas ocurre en todo el punto de máxima eficiencia de la bomba (lo que corresponde a la situación ideal), entonces en esta figura también se indica el caudal nominal (línea vertical de color rojo) y los valores de caudal máximo y mínimo permisibles (líneas verticales punteadas de color verde), de acuerdo con las recomendaciones del (Hydraulic Institute ANSI/HI 14.1-14.2, 2019).

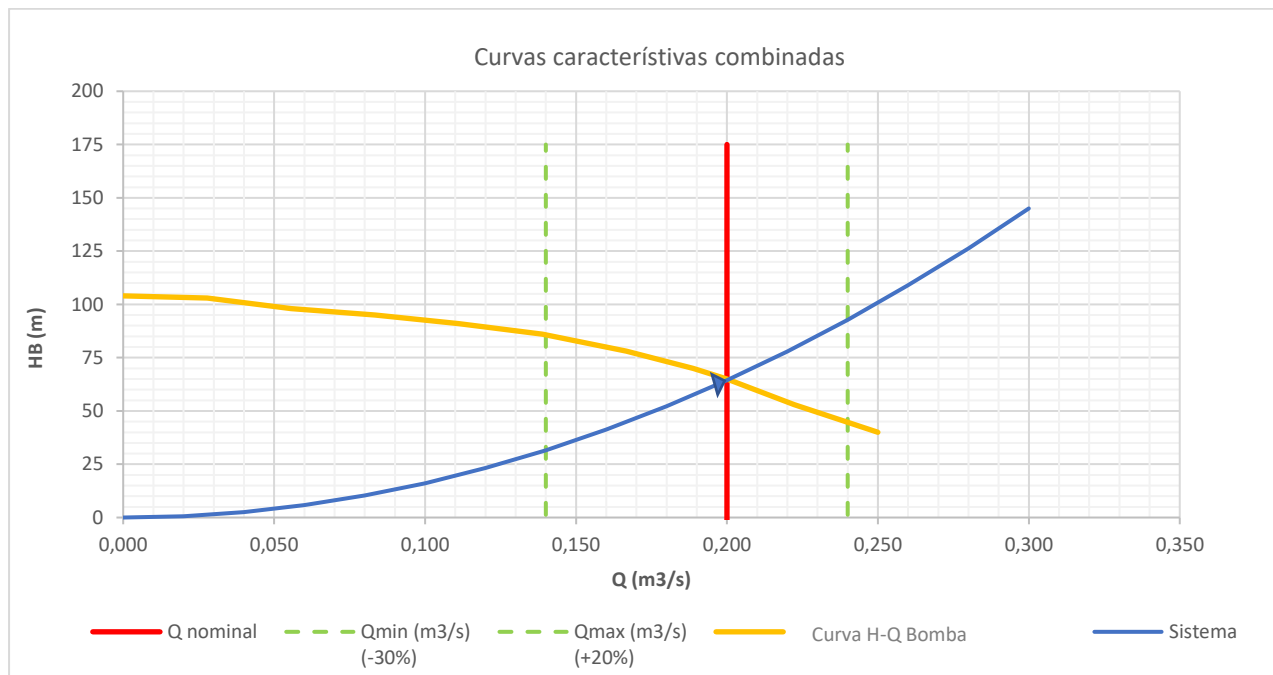


Figura 15: Curvas características combinadas. Elaboración propia.

Con las curvas características combinadas como las ilustradas en la Figura 15 es posible contar con la información suficiente para determinar las condiciones de caudal y altura bajo las cuales funciona una bomba determinada. Con el transcurso del tiempo en operación, es posible que las pérdidas por fricción aumenten, afectando la capacidad y el funcionamiento de la bomba, ya que un aumento en las pérdidas por fricción se ve reflejado en un aumento de la pendiente de la curva H-Q del sistema de tubería, por lo que es muy importante hacerle el seguimiento o monitoreo a la forma de la curva H-Q a medida que transcurre el tiempo para determinar el nuevo punto de corte entre la curva de la bomba y la curva del sistema, y de esta manera verificar a su vez la evolución de la eficiencia, su consumo de energía, y si para las nuevas condiciones de operación, el punto de trabajo se encuentra dentro de los límites establecidos por las normas internacionales aplicables.

#### **4.4.6 Curvas compuestas de un conjunto de bombas operando en paralelo**

En sistemas donde se tienen grandes caudales, las bombas son acopladas en paralelo con una succión y descarga desde y hasta un punto en común. En este tipo de arreglos, el caudal se incrementa, mientras se mantiene la misma altura. Esta solución proporciona flexibilidad y redundancia. Cuando las bombas funcionan en paralelo, se puede cambiar el caudal en pasos o de manera secuencial según la cantidad y el tamaño de las bombas que están funcionando al mismo tiempo. El incremento de caudal puede ser visto cuando se combinan las curvas H Vs Q de las bombas en operación. Arrancando solo aquellas bombas que se necesitan para cumplir con la demanda, normalmente se puede lograr la operación cerca de la máxima eficiencia. Las características de altura-caudal de las bombas no necesitan ser idénticas, pero las características inestables pueden ser un inconveniente durante su operación, a menos que se pueda asegurar la operación sólo en la parte estable de la curva característica. Una curva H-Q inestable se refiere a una curva de una bomba que presenta la característica particular de que a una misma altura la bomba podría trabajar a dos o más caudales diferentes como se ilustra en la Figura 16. Obsérvese que, en este caso, la curva del sistema corta en dos o más puntos diferentes (en este caso en tres puntos) a la curva del sistema (no en un único punto como se esperaría). Esta situación hace que la bomba opere de manera inestable, es

decir, de manera fluctuante o pulsante entre estos caudales. Este es el caso por ejemplo de las bombas de flujo axial, como las utilizadas en sistemas de riego, en las que se requiere la descarga de grandes caudales a presiones de operación muy bajas.

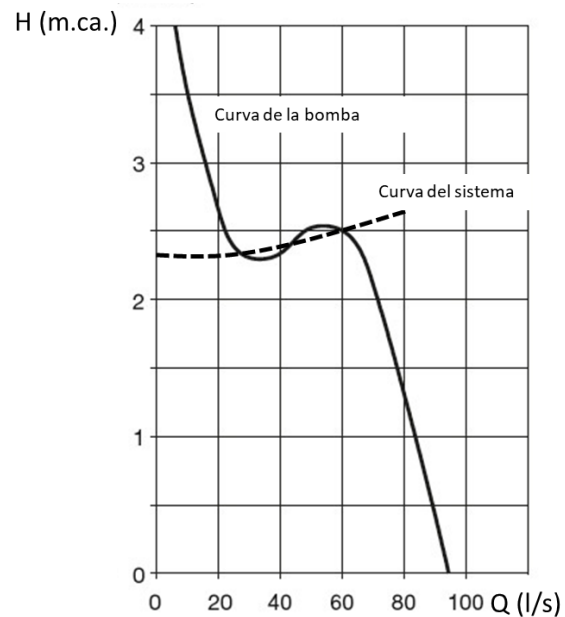


Figura 16: Curva H-Q inestable de una bomba. Elaboración propia.

En la Figura 17 se muestran las curvas de una bomba operando individualmente y sistemas operando con dos y tres bombas de idénticas características operando en paralelo, la curva característica conjunta se obtiene sumando las capacidades de las bombas individuales a una misma altura de presión.

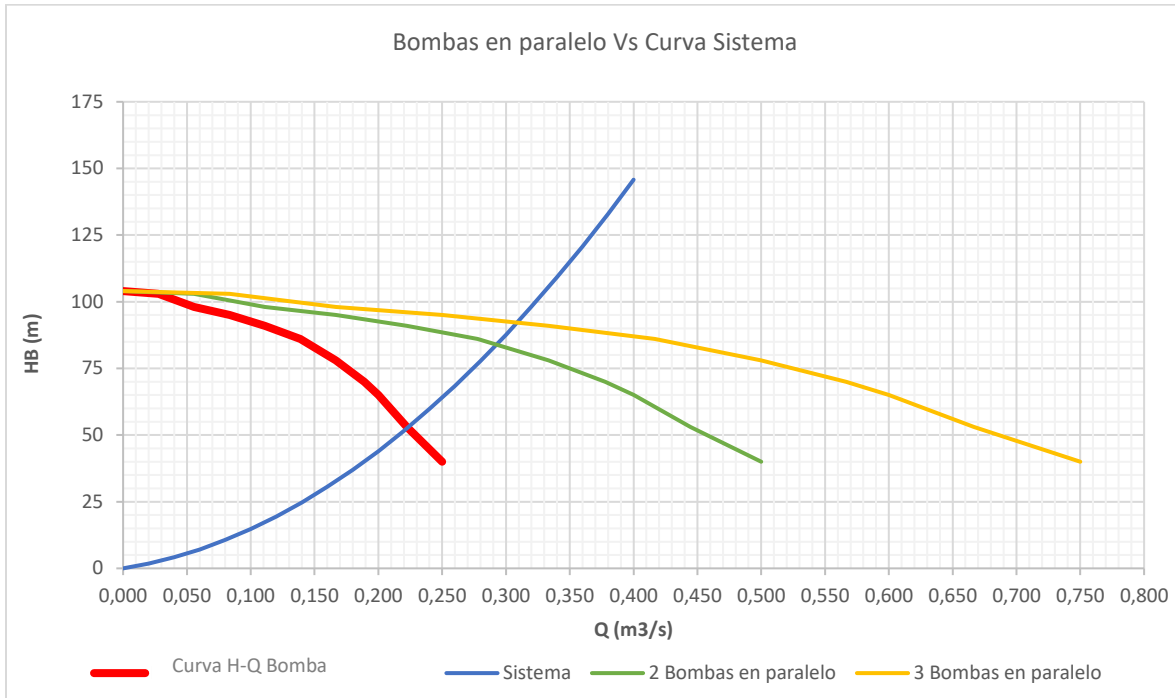


Figura 17: Curvas de una bomba operando individualmente y sistemas operando con dos y tres bombas de idénticas características operando en paralelo. Elaboración Propia.

#### 4.4.7 Curvas compuestas de un conjunto de bombas operando en serie

Las bombas se operan en serie para proporcionar alturas mayores que las de las bombas operando individualmente. En la Figura 18 se muestran las curvas de una bomba operando individualmente y sistemas operando con dos y tres bombas de idénticas características operando en serie. Las curvas conjuntas de los grupos de bombas se obtienen sumando las alturas de las bombas individuales a una misma capacidad.

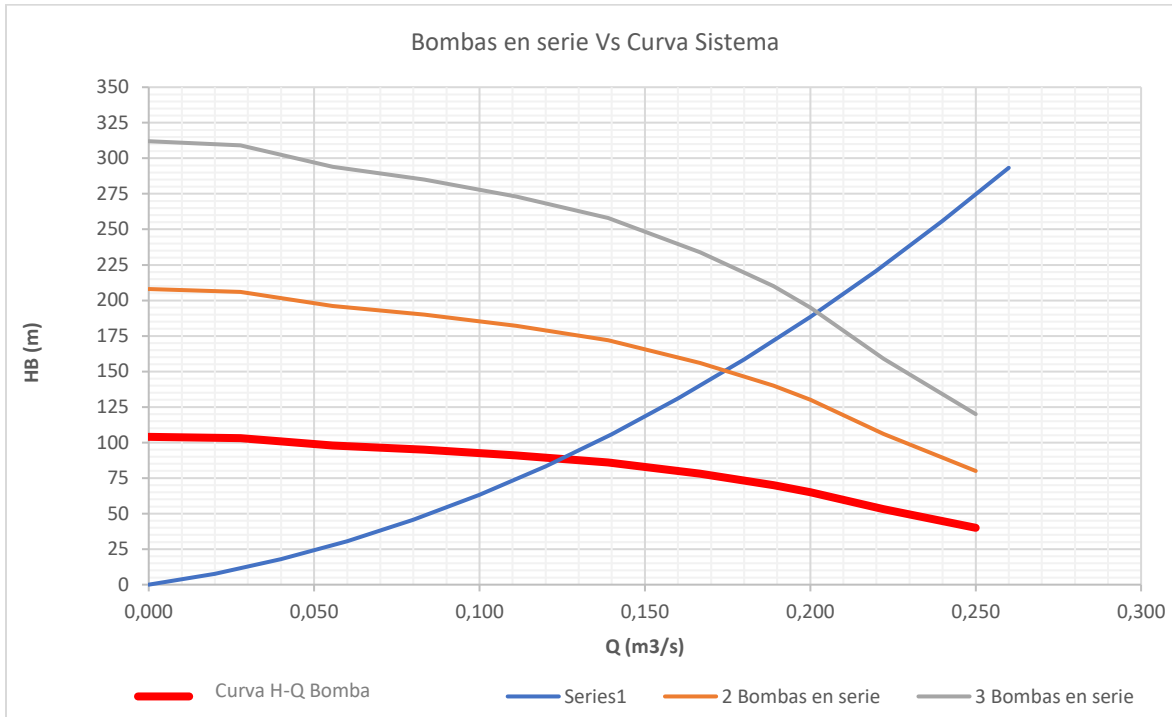


Figura 18: Curvas compuestas de un conjunto de bombas operando en serie. Elaboración Propia.

## 4.5 EFECTOS DE LA PÉRDIDA DE EFICIENCIA EN BOMBAS CENTRÍFUGAS

En el funcionamiento general de una bomba, se producen tres tipos de pérdidas de energía o de potencia: Pérdidas hidráulicas ( $P_h$ ), pérdidas volumétricas ( $P_v$ ) y pérdidas mecánicas ( $P_m$ ). Todas estas pérdidas representan una pérdida de potencia de la bomba. (Quirós Morales).

### 4.5.1 Pérdidas hidráulicas $P_h$ (Quirós Morales)

Disminuyen la altura útil. Son de dos clases: pérdidas de superficie (también llamadas pérdidas primarias) producidas por el rozamiento del fluido con las paredes de la bomba o de las partículas del fluido entre sí; y las pérdidas de forma que son producidas por el desprendimiento de capa límite en los cambios de dirección y de toda forma difícil al flujo en particular a la entrada del rodete si la tangente del álabe no coincide con la dirección de la velocidad relativa a la entrada; o a la salida del rodete si la tangente del álabe de la corona directriz no coincide exactamente con la velocidad absoluta a la salida. Las pérdidas hidráulicas se originan en:

- En el interior del rodete
- En la corona directriz, si existe
- En la caja espiral
- Desde la salida de la caja espiral hasta la salida de la bomba.

#### **4.5.2 Pérdidas volumétricas $P_v$ (Quirós Morales)**

Las pérdidas volumétricas son pérdidas de caudal. Se dividen en pérdidas exteriores ( $q_e$ ) y pérdidas interiores ( $q_i$ ).

Las pérdidas volumétricas exteriores  $q_e$ , constituyen una fuga del fluido al exterior, el fluido se escapa por el juego entre la carcasa y el eje de la bomba que la atraviesa. Estas fugas pueden ser reducidas, incluso hasta cero, utilizando una caja de empaquetaduras (estopa y prensaestopas) que se llena de estopa o material de cierre, provista de su correspondiente prensa estopa con pernos.

Las pérdidas interiores,  $q_i$ , son las más importantes y reducen significativamente el rendimiento volumétrico de algunas bombas (aunque  $q_e = 0$ ). A la salida del rodete de una bomba hay más presión que a la entrada. Luego, parte del fluido en lugar de seguir a la caja espiral retrocederá por el conducto que forma el juego del rodete con la carcasa, a la entrada del rodete, para volver a ser impulsado por la bomba. Este caudal, llamado caudal de corto circuito, absorbe energía del rodete.

#### **4.5.3 Pérdidas mecánicas $P_m$ (Quirós Morales)**

Las pérdidas mecánicas son producidas por

1. El rozamiento de la prensa estopa con el eje de la máquina
2. El rozamiento del eje con los cojinetes
3. El accionamiento de auxiliares (bomba de engranaje para lubricación, cuentarrevoluciones, etc.)
4. Rozamiento de disco. Se llama así el rozamiento de la pared exterior del rodete con la atmósfera de fluido que le rodea. Es decir, el rodete de una bomba, en esquema, es un disco dentro de una caja en cuyo interior circula un fluido (dentro del disco – rodete – también circula fluido). El disco no gira, pues, en el vacío, sino

en una atmósfera viscosa donde se produce un rozamiento que se incluye dentro de las pérdidas mecánicas y se denomina pérdida por rozamiento de disco.

Todas las pérdidas descritas anteriormente  $P_m$ ,  $P_v$  y  $P_h$ ; hacen disminuir en mayor o menor grado la eficiencia total de las bombas, mientras más grandes sean las pérdidas, menor será la eficiencia y mayor potencia se requerirá para su accionamiento.

#### **4.5.4 Eficiencia hidráulica $\eta_h$**

Considera las pérdidas por fricción en todo el recorrido del fluido, incluido el codo y brida de succión, el impulsor, los álabes de difusión, la voluta de la carcasa y los pasajes de comunicación entre rodets en las bombas multietapas.

$$\eta_h = \Delta H / \Delta H_i = (\Delta H - \Delta HL) / \Delta H_i \quad (9)$$

(Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2006)

Donde,

$\Delta H =$  Relación de altura de salida de la bomba

$H_i =$  Altura a la entrada de la bomba

#### **4.5.5 Eficiencia volumétrica $\eta_v$**

Tiene en cuenta las fugas a través de los anillos de desgaste, de los laberintos internos y de los dispositivos de equilibrio.

$$\eta_v = Q / (Q + Q_L) \quad (10)$$

(Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2006)

Donde,

$Q_L =$  Fuga desde la salida hasta la entrada del impulsor ( $m^3/s$ )

$Q:$  Caudal efectivo impulsado por la bomba ( $m^3/s$ )

$Q + Q_L :$  Caudal teórico o caudal bombeado por el rodete ( $m^3/s$ )

#### 4.5.6 Eficiencia mecánica $\eta_m$

Considera las pérdidas en el cojinete, la caja de empaquetadura y toda la fricción del disco, incluidas las pérdidas de los anillos de desgaste y los discos o tambores de equilibrio, si aplica.

$$\eta_m = P_1/P_S = (P_S - P_D)/P_S \quad (11)$$

(Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2006)

Para una bomba típica y de impulsor cerrado, a continuación se describen los términos empleados en la ecuación (11),

$P_1 =$  Potencia entregada a todo el fluido que fluye a través del impulsor (kW)

$P_S =$  Potencia en el eje de la bomba centrífuga (kW)

$$P_D = P_S - P_1$$

En general, el componente principal de  $P_D$  es la fricción del disco y la "eficiencia mecánica" es la porción de la potencia del eje que se entrega al fluido que fluye a través de los pasajes del impulsor.

#### 4.5.7 Eficiencia total de la bomba

La eficiencia  $\eta$  es el producto de los tres componentes de eficiencia descritos en los numerales anteriores.

$$\eta = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad (12)$$

(Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2006)

Donde,

$\eta_m$ : es la eficiencia mecánica

$\eta_h$ : es la eficiencia hidráulica

$\eta_v$ : es la eficiencia volumétrica

#### 4.5.8 Eficiencia máxima alcanzable en una bomba centrífuga

Las pérdidas mínimas y, por lo tanto, las eficiencias máximas se pueden encontrar en valores cercanos de  $Ns \cong 2500$  (0.91), de acuerdo con las curvas de eficiencia para diferentes valores de velocidad específica y que se presenta a continuación en la Figura 19.

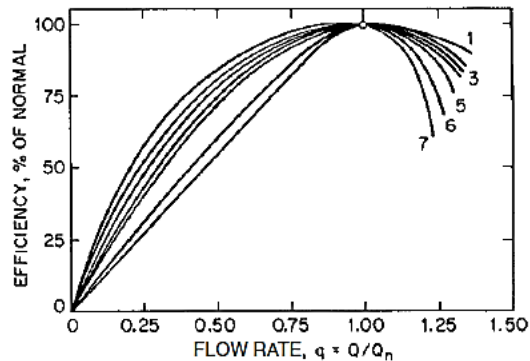


Figura 19: Curvas de eficiencia para diferentes valores de velocidad específica.  
Tomada de (Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2006).

En la Figura 19, los números del 1 al 7 que se encuentran al lado de cada curva de eficiencia, corresponde a valores para la velocidad específica.

#### 4.5.9 Efectos de la velocidad específica ( (Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2006) )

La Figura 20 muestra que la máxima eficiencia se obtiene en el rango  $2000$  ( $0.73$ )  $< \eta S < 3000$  ( $1.10$ ), por esta razón es importante verificar la velocidad específica de los sistemas de bombeo que sean evaluados con el propósito de mejorar su eficiencia, ya que mediante la información presentada en esta figura, se podrá establecer el potencial de mejoramiento de la eficiencia que puede ofrecer una unidad de bombeo en una determinada aplicación.

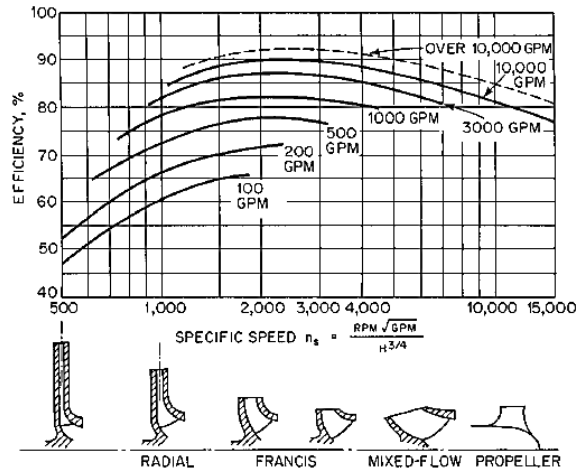


Figura 20: Eficiencia de la bomba Vs velocidad específica y tamaño (Flowserve Corporation).  
Tomado de (Karassik, Messina, Cooper, & Heald, 2006)

#### 4.5.10 Consecuencias relacionadas con el punto de operación del sistema

Según lo consignado en el Manual de optimización de sistemas de Bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018), debido a la gran cantidad de energía que consumen las bombas, los sistemas de bombeo son un excelente candidato para generar ahorros energéticos. De la energía que se usa a nivel mundial para bombear, aproximadamente el 75% corresponde a bombas centrífugas y el 25% restante a bombas de desplazamiento positivo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).

A lo largo de los años, las bombas han ido mejorando su desempeño gracias a un diseño optimizado y al uso de mejores técnicas de fabricación. No obstante, la eficiencia de las bombas centrífugas sigue dependiendo en gran medida del lugar de la curva en la que se las opera. En el caso de las bombas que no se operan respetando los requisitos del sistema, siempre hay una posibilidad de ahorrar energía optimizando el sistema.

#### 4.5.11 Alteración de la forma de las curvas características ocasionada por el deterioro de las bombas centrífugas.

En el manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018), se menciona que después de un determinado tiempo de funcionamiento, las bombas necesitan ajustes para mantener su eficiencia original. Los ajustes dependen del tipo de bomba, pero pueden consistir en ajustar las placas gastadas

o la distancia entre el impulsor y la carcasa. Si no se procede a realizar los ajustes periódicamente, es posible que las características de la bomba cambien y que empiece a funcionar fuera de la región operativa recomendada. Una buena práctica consiste en determinar los valores de referencia de la bomba justo cuando se pone en marcha el sistema de bombeo, para luego realizar ensayos periódicos para detectar eventuales desviaciones respecto a esos valores de referencia. En la Figura 21, puede verse el efecto del desgaste de la bomba sobre sus características.

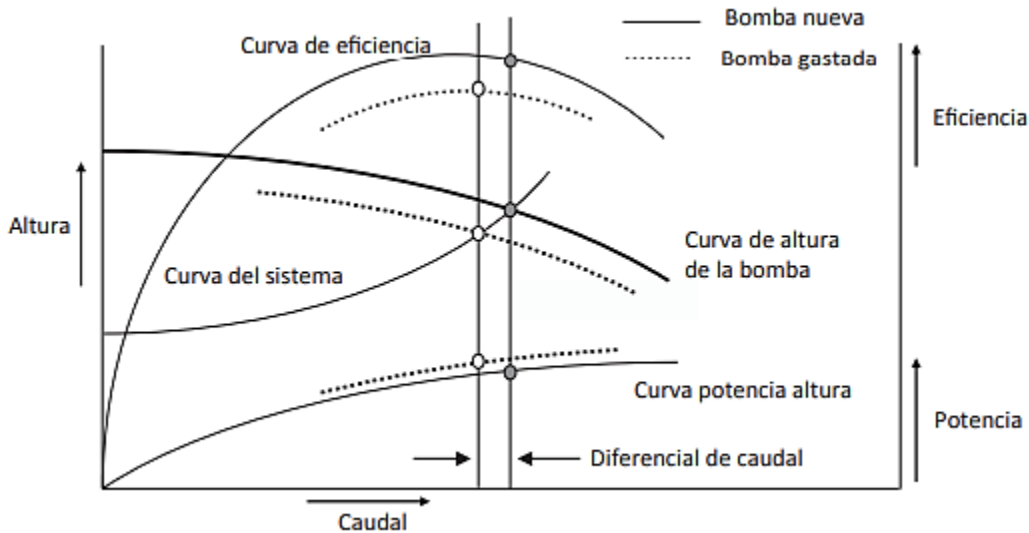


Figura 21: Efecto del desgaste de la bomba sobre sus características. Tomado del Manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).

Las bombas se desgastan de muchas maneras. Por un lado, la eficiencia, el caudal y la presión disminuyen casi siempre. Por el otro lado, la potencia puede aumentar o disminuir, según la bomba. Esta distinción es importante porque, por ejemplo, las bombas que se usan en sistemas como los de riego suelen consumir más energía cuando se mejora la eficiencia de la bomba, pero la bomba sigue funcionando la misma cantidad de tiempo (y, por lo tanto, mueve más flujo). En este tipo de sistema, para aprovechar los beneficios del aumento de la eficiencia de la bomba, hay que hacerla funcionar menos tiempo. Tomado del Manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).

#### **4.5.11.1 Punto de operación**

Una bomba funciona en el punto de la curva en el que hay equilibrio entre la presión que entrega la bomba y la presión necesaria para que un caudal determinado circule a través del sistema al que la bomba pertenece, esto se ve en el punto de intersección de las curvas de la Figura 15: Curvas características combinadas. La curva del sistema puede variar, por ejemplo, si se manipula la válvula de descarga del sistema de bombeo que aumente la resistencia del sistema. En este caso, la curva sería más pronunciada.

De lo anterior, se infiere que cuando el punto de funcionamiento se mueve hacia la izquierda en la curva de la bomba, las fuerzas internas del impulsor de la bomba aumentan, lo que puede limitar la vida útil del equipo. Por lo tanto, hay que evitar que la bomba funcione en un punto muy arriba de la curva de la bomba por mucho tiempo. Por esta razón, los fabricantes proveen información sobre la región de funcionamiento admisible. Si se opera una bomba fuera de los límites de esta región durante mucho tiempo, la vida útil del equipo puede verse seriamente afectada.

En muchas industrias, el caudal de la bomba se controla regulando una válvula en la descarga de la bomba. La válvula regulada puede controlarse para que mantenga un valor determinado de caudal, presión o de cualquier otro parámetro de acuerdo con las necesidades del sistema. Ya sea que se coloque en el sistema una sola válvula o varias, el caudal de la bomba disminuye debido al aumento de la resistencia en el sistema de tuberías. Esto hace que el punto de funcionamiento de la bomba se desplace hacia arriba de la curva de la altura de la bomba, como se ilustra en la Figura 22.

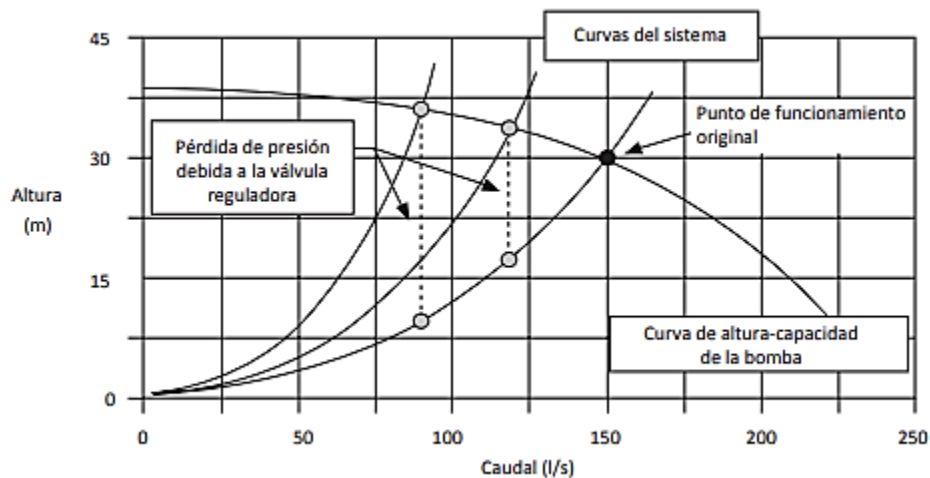


Figura 22: Variación en el punto de funcionamiento de una bomba. Tomado del Manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).

Como se observa en la Figura 22, la regulación debida a la apertura de la válvula en la descarga del sistema de bombeo aumenta la presión que se necesita para que el fluido se mueva a través del sistema. Las líneas verticales de la figura representan las pérdidas por fricción en la válvula. Las pérdidas por regulación, que son proporcionales al caudal multiplicado por la pérdida de presión en la válvula, pueden ser muy importantes.

Las figuras siguientes representan la energía que se usa en los diferentes puntos de funcionamiento de un sistema con regulación.

En la Figura 23 se presentan las pérdidas en una bomba que funciona en el punto de eficiencia óptima, en un sistema que no tiene ninguna regulación en la descarga. Las únicas pérdidas son las del motor y de la bomba.

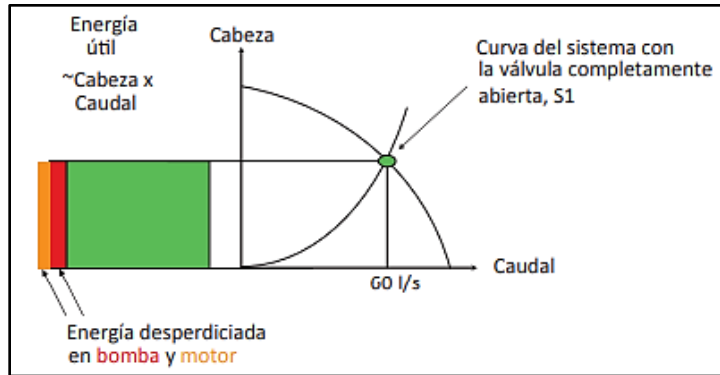


Figura 23: Punto de operación en el punto de eficiencia óptima en un sistema sin regulación. Tomado del Manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).

En la Figura 24 se muestra la energía útil que se transfiere al fluido y las pérdidas de energía en el motor, la bomba y la válvula: las pérdidas de la bomba son mayores debido al cambio en el punto de funcionamiento. Debido al cierre parcial de la válvula en la descarga, el punto de operación se mueve hacia la izquierda de la curva original de la bomba.

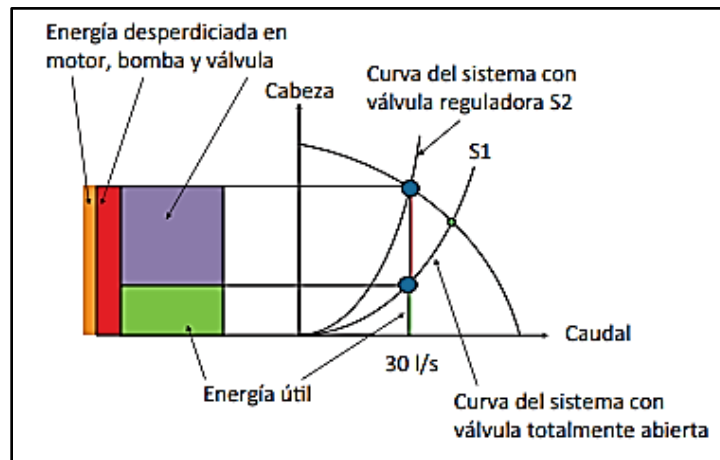


Figura 24: Punto de operación de un sistema que funciona con una válvula en la descarga parcialmente cerrada. Tomado del Manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).

En la Figura 25 se observa un sistema con una bomba totalmente regulada, el punto de funcionamiento se desplaza hacia la izquierda, la eficiencia de la bomba cae aún más y las pérdidas de la válvula se incrementan: solo una pequeña fracción de la energía que se suministra al motor es usada para mover el fluido.

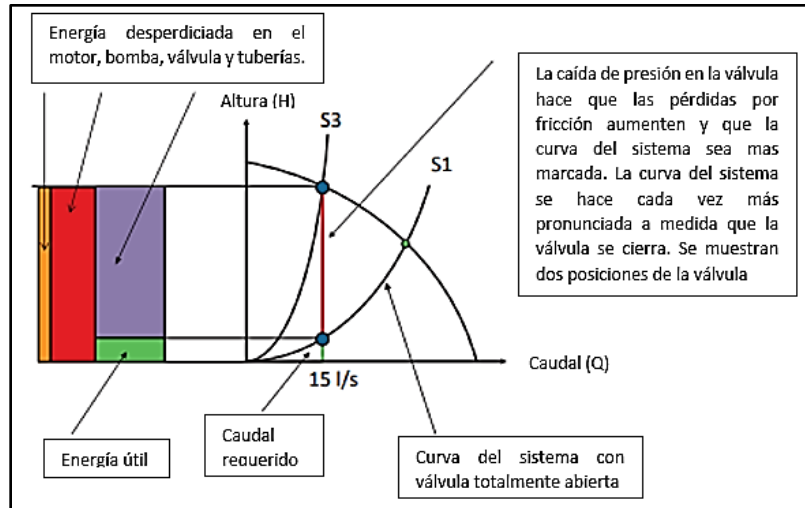


Figura 25: Punto de operación de un sistema que funciona con una válvula en la descarga parcialmente cerrada. Tomado del Manual de optimización de sistemas de bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).

#### 4.5.11.2 Máxima eficiencia de un sistema de bombeo

De acuerdo con lo indicado en el Manual de optimización de sistemas de Bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018), las bombas centrífugas tienen un punto de eficiencia óptima, que puede verse en la curva de la bomba. Es el punto de diseño de la bomba. En este punto, la eficiencia alcanza su máximo, mientras que las fuerzas a las que está sometida la bomba están en su punto mínimo. Cuando la bomba se opera fuera del punto de eficiencia óptima (BEP por sus siglas en inglés), su eficiencia disminuye.

Debido a que las fuerzas hidráulicas que pueden dañar la bomba aumentan rápidamente cuando la bomba se opera fuera del punto de eficiencia óptima, los fabricantes indican la «región operativa recomendada o permitida» en torno al punto de eficiencia óptima. Si se opera la bomba fuera de esta región durante mucho tiempo, la bomba puede dañarse.

La confiabilidad y, en consecuencia, los costos de mantenimiento dependen del punto de la curva en el que se opere la bomba. En la Figura 26, se ilustra cómo varía la confiabilidad en relación con la distancia al punto de eficiencia óptima. Como puede observarse, incluso las más pequeñas desviaciones respecto del punto de eficiencia óptima tienen una gran influencia sobre la confiabilidad.

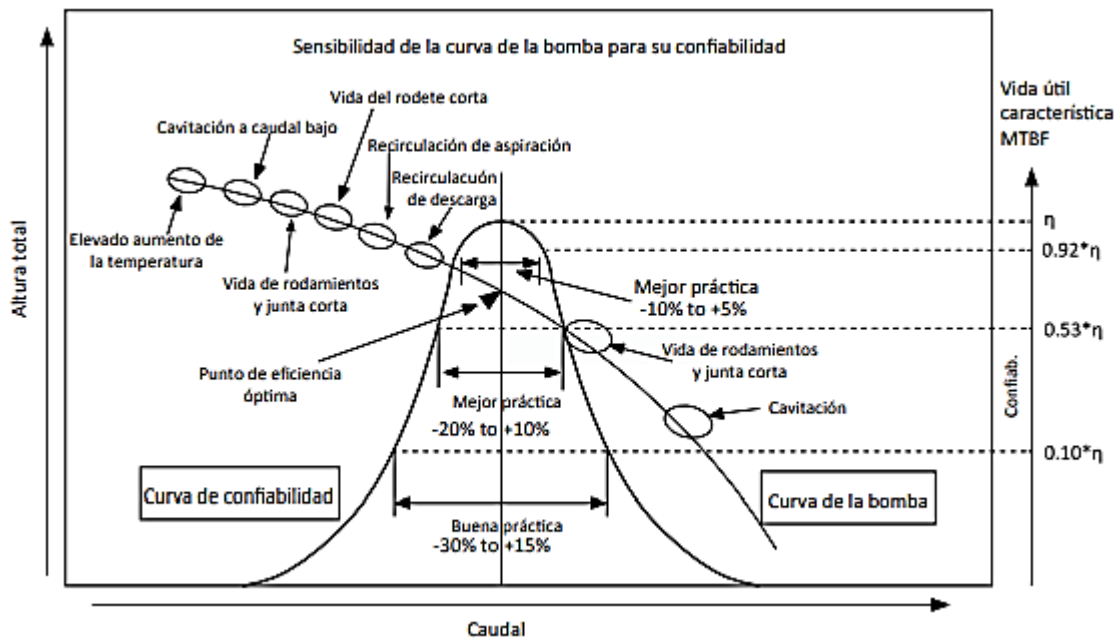


Figura 26: Confiabilidad en función de la distancia con respecto al punto de eficiencia óptima (BEP). Tomada del Manual de optimización de sistemas de Bombeo (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).

Cuando se opera la bomba fuera del punto de eficiencia óptima, la fuerza que ejerce el fluido sobre el impulsor de la bomba aumenta rápidamente. Dado que la vida útil de los rodamientos depende de las fuerzas que se ejercen sobre ellos, su vida útil también se verá afectada. Además, cuando las fuerzas aumentan, también aumenta la deflexión del eje, lo que tiene un impacto negativo sobre la vida útil de las juntas. Si la desviación con respecto al punto de eficiencia óptima es grande, puede haber vibraciones causadas por cavitación o por recirculación en el impulsor. El fluido se vuelve más inestable aun, lo que puede dañar el impulsor y acortar su vida útil. Tomado de (Eficiencia Energética Industrial en Colombia, 2018).

## 5 CARACTERIZACIÓN Y PRUEBAS HIDRÁULICAS

La caracterización de una bomba centrífuga y de su sistema de bombeo consiste en medir los parámetros y variables principales que caracterizan el comportamiento de la bomba, como son: el caudal, la presión y la potencia correspondientes al punto de operación, determinar las curvas experimentales de la bomba y de sus tuberías, determinar el punto de máxima eficiencia de la bomba y conocer experimentalmente el NPSH requerido por la bomba y disponible en el sistema de tuberías. Para caracterizar la bomba y su sistema de bombeo es necesario recurrir a la ejecución de pruebas de desempeño las cuales pueden realizarse bien sea en el mismo sitio de instalación, o bien en un laboratorio de pruebas adecuado. Estas pruebas se realizan con base en las normas del instituto de hidráulica de Estados Unidos (HI 14-6b Rotodynamic Pumps for Hydraulic Performance Tests); las cuales establecen como requisito fundamental que los diferentes instrumentos de medición se encuentren debidamente calibrados y ajustados para las condiciones y magnitudes de las variables que se pretende medir. Igualmente, la precisión del instrumento será una variable muy importante que debe considerarse puesto que de ella dependerá la tolerancia de cada una de las mediciones que sean realizadas durante las pruebas, cada medidor en particular tendrá asociada una tolerancia específica que será tomada en cuenta en la evaluación de los resultados.

Las pruebas de desempeño para determinar las curvas H-Q de la bomba y del sistema están basadas en la aplicación de la ecuación de Bernoulli. Para el caso de la curva H-Q de la bomba, se aplica la ecuación de Bernoulli entre la brida de entrada a la bomba y la brida de salida de la bomba, mientras que para el caso de la curva H-Q del sistema de tuberías, se aplica la ecuación de Bernoulli entre la superficie del agua en el tanque de succión y el extremo de descarga final de la tubería de impulsión.

Véase la ecuación (14 y la Figura 27: Imagen ilustrativa de un sistema de tuberías y tanques asociados a un sistema de bombeo. Elaboración propia. )

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{1}{2g}V_1^2 + Z_1 = \frac{P_3}{\gamma} + \frac{1}{2g}V_3^2 + Z_3 \quad (13)$$

*El punto 1 es el nivel superior del tanque 1, y el nivel de referencia para aplicar la ecuación (14 es la cota de la tubería de descarga del sistema de bombeo*

*H: es la energía o cabeza total del sistema en metros*

*Z: es la elevación, por encima (+) o por debajo (-) del punto de referencia.*

*V: es la velocidad del fluido en m/s*

$$V_1 = 0$$

*g: es la aceleración de la gravedad (9.897 m/s<sup>2</sup>)*

*P: es la presión (N/m<sup>2</sup>)*

$$P_1 = P_{atm}$$

*γ; es el peso específico del líquido (N/m<sup>3</sup>)*

*De lo anteriormente indicado, se desprende la ecuación (14)*

$$H = \frac{P_3}{\gamma} + \frac{1}{2g}V_3^2 + Z \quad (14)$$

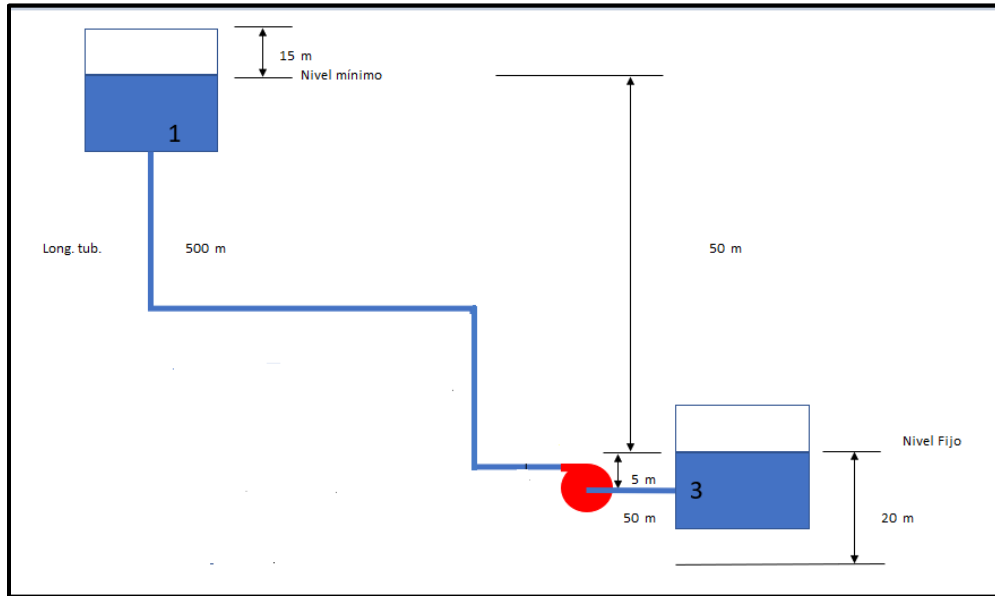


Figura 27: Imagen ilustrativa de un sistema de tuberías y tanques asociados a un sistema de bombeo.  
Elaboración propia.

Las pruebas de desempeño para determinar la curva de potencia Vs caudal de la bomba están basadas en la medición de la potencia consumida por el equipo de bombeo para diferentes posiciones de apertura de una válvula en la descarga, con lo cual se tendrán diferentes valores de caudal para graficar dicha curva. Véase lo indicado en el capítulo 4.3.10 más atrás. A continuación, se retoman los conceptos de potencia eléctrica y de potencia hidráulica mencionada.

#### **Potencia eléctrica de entrada del motor ( $P_{mot}$ )** (Ver más atrás 4.3.10.1)

La potencia eléctrica suministrada al motor por la red eléctrica, medida en kW.

#### **Potencia de salida de la bomba ( $P_w$ ) o Potencia hidráulica** (Ver más atrás 4.3.10.3)

La potencia entregada al líquido por la bomba, es también llamada potencia hidráulica de la bomba. Es la potencia que tiene el flujo producido por la bomba en la brida de salida.

$$(P_w)[kW] = QH\rho g/1000 \quad (15)$$

Donde,

$$Q[m^3 / s]; H[m]; \rho[kg / m^3 ]; g = 9,81[m / s^2 ]$$

Las pruebas de desempeño para determinar las curvas de NPSH requerido y disponible se realizan con base en la aplicación de la ecuación de Bernoulli entre la superficie del agua en el tanque de succión y la brida de entrada de la bomba.

## **6 DISEÑO METODOLÓGICO PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN SISTEMAS DE BOMBEO CON BOMBAS CENTRÍFUGAS – DESARROLLO DE UN CASO PRÁCTICO.**

### **6.1 GENERALIDADES**

Para la optimización energética se ha seleccionado la estación de bombeo del laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT, sede Medellín, que cuenta con un sistema de bombeo conformado por seis bombas que pueden operar de manera individual, en serie o en paralelo, dependiendo de las necesidades de altura y caudal.

### **6.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO ANALIZADA**

El sistema analizado está compuesto por tres de las seis bombas conectadas en paralelo, que son alimentadas por una tubería de succión general de 4” de diámetro desde el tanque que hace las veces de succión y descarga del sistema, ver Figura 28: Imagen esquemática de la estación de bombeo analizada.

El tipo de bombas que ha sido analizado corresponde a las bombas centrífugas horizontales, de succión por un extremo, directamente acopladas al motor, e instaladas en pozo seco, como corresponde al tipo de bomba ilustrado en la Figura 2. Los datos para realizar los análisis de estas unidades de bombeo fueron tomados a partir de mediciones de presión, caudal, potencia y velocidad de rotación, utilizando la instrumentación existente en el laboratorio, como son los manómetros instalados en el lado de succión y de descarga de cada bomba, un medidor de caudal marca Krohne instalado en la descarga común del conjunto de bombas, y medidores de potencia y rpm instalados en los tableros de potencia y control de las bombas.

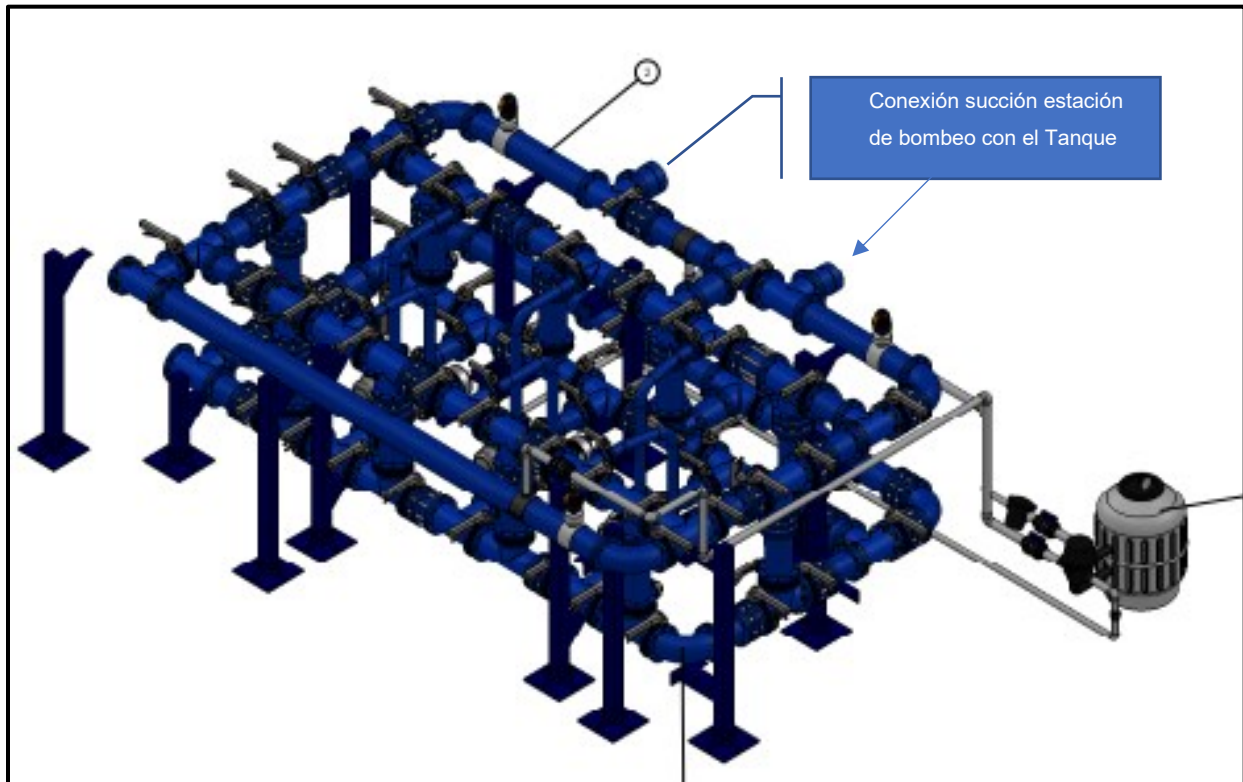


Figura 28: Imagen esquemática de la estación de bombeo analizada. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT

Los datos del sistema analizado se resumen a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2: Datos de las tuberías de succión y descarga del sistema de bombeo.

DATOS	Succión	Descarga
Diámetro nominal (pul)	4	3
Espesor (Schedule 40) (mm)	6,02	5,49
Diámetro exterior (mm)	114,3	88,9
Diámetro interior (mm)	102,26	77,92
Diámetro interior (m)	0,10226	0,07792
Área (m <sup>2</sup> )	0,008	0,005

Las bombas son marca Goulds y la curva de desempeño es la indicada en color rojo en la Figura 29.

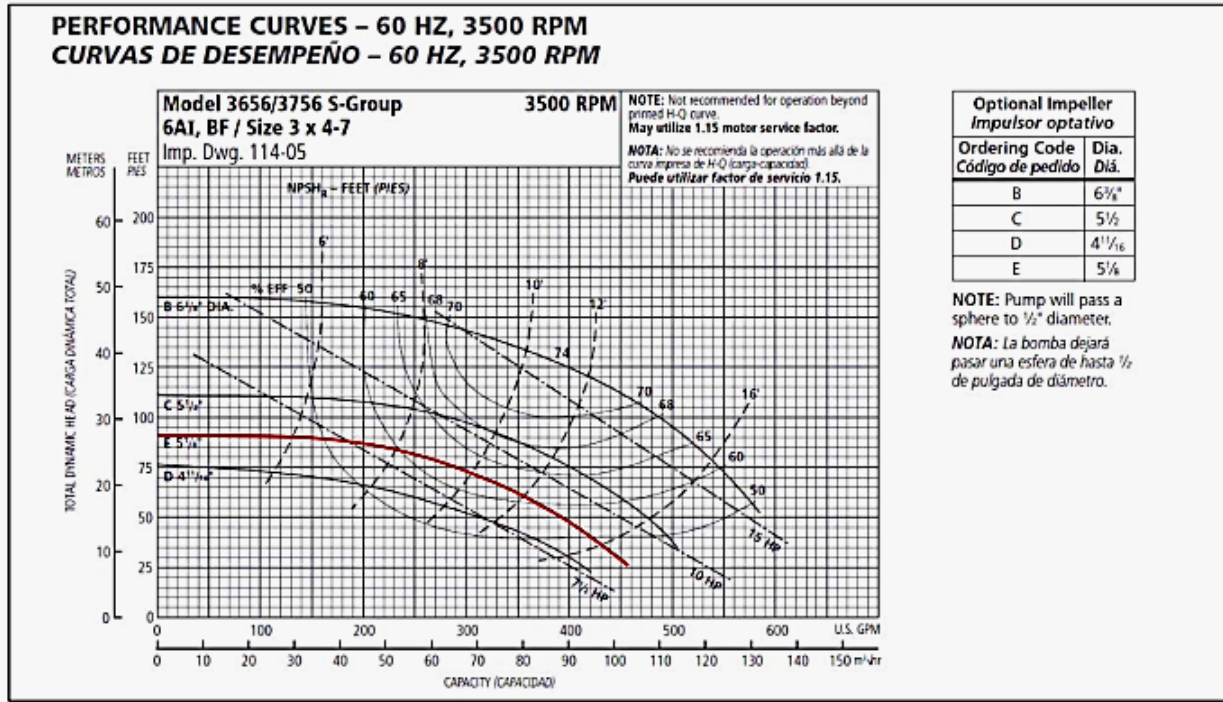


Figura 29: Curva de desempeño de las bombas analizadas – Curvas del fabricante de las bombas. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT.

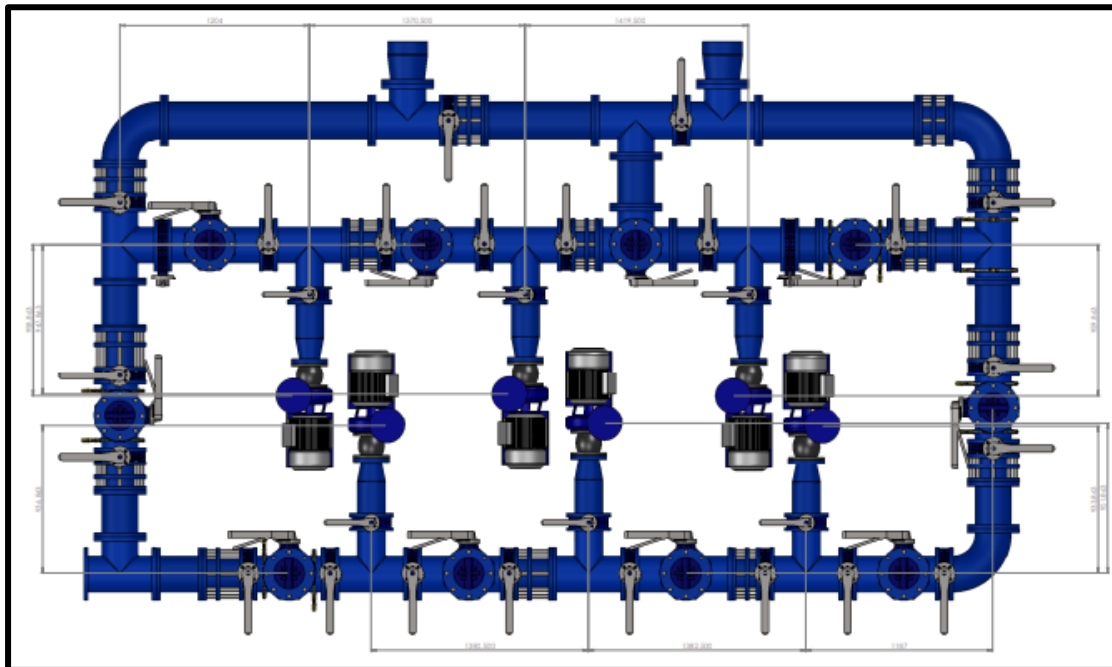
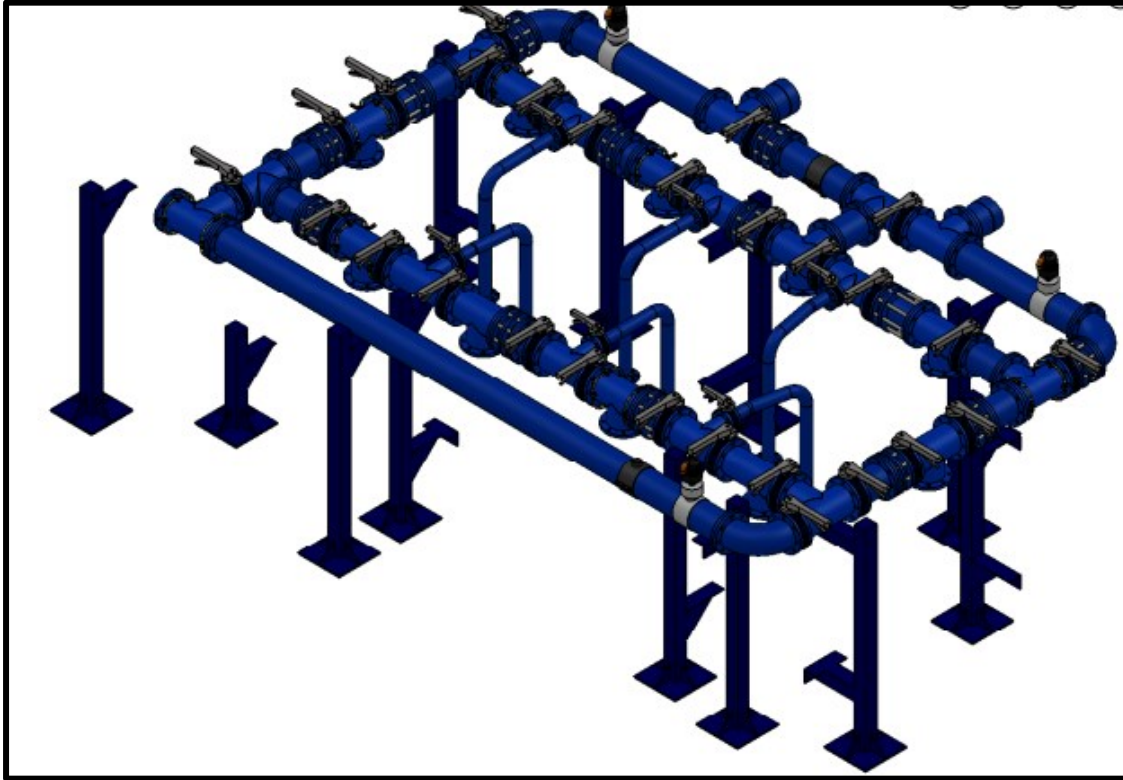


Figura 30: Anillo de succión de la estación de bombeo Analizada. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT.



*Figura 31: Anillo de descarga de la estación de bombeo Analizada. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT.*

La descarga del sistema de bombeo está conectado a un circuito cerrado de tuberías localizado en el nivel superior del laboratorio de la universidad y es como se muestra a continuación en la Figura 32.

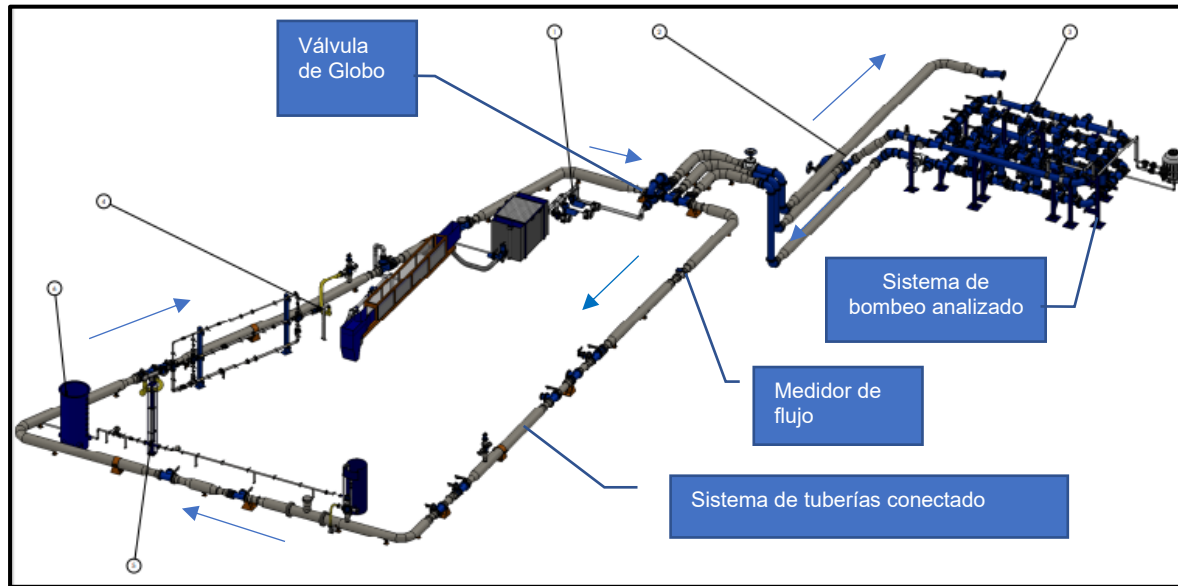


Figura 32: Sistema Analizado. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT.

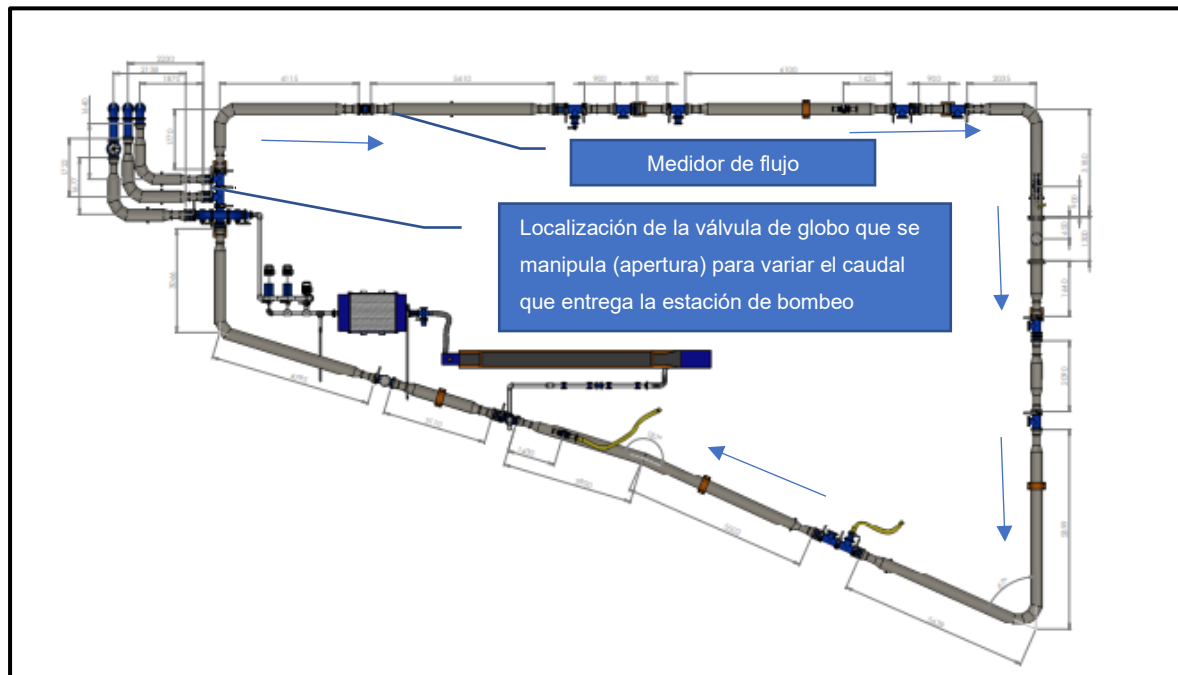


Figura 33: Sistema de tuberías conectado a la estación de bombeo. Información suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT.

### **6.3 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LAS MEDICIONES EN EL SISTEMA ANALIZADO**

1. Se purgan las tuberías del sistema de descarga usando el canal de pendiente variable y las bombas trabajando a 2500 r.p.m.
2. Se cierra la válvula que comunica el anillo de descarga de GRP con el canal de descarga, se estabiliza el sistema (Q y H succión).
3. Tiempo aproximado entre mediciones: 5 min para estabilización del sistema.
4. Se toman datos del caudal en el medidor de flujo, con la válvula globo indicada en la Figura 32 y en la Figura 33, completamente abierta, una vez el sistema se estabiliza se registran los valores de presión en la succión y en la descarga de la bomba, trabajando de manera individual y a una velocidad de 3500 r.p.m. A esta velocidad se realizan las pruebas de desempeño de las tres bombas.
5. Se varía la apertura de la válvula y se repite el procedimiento: esperar que el sistema se estabilice y se registran los datos de caudal y de presión en la succión y en la descarga.
6. Se cierra completamente la válvula y se registran los datos en la succión y en la descarga de la bomba.
7. Se repiten los pasos anteriores para las tres bombas (bombas 1, 3 y 5), trabajando de manera individual.
8. Se ponen a trabajar las bombas 1 y 3 en paralelo, se registran los datos de presión en la succión y en la descarga para cada posición de apertura de la válvula, iniciando con la válvula completamente abierta y finalizando con la válvula cerrada.
9. Se repite el procedimiento anterior para el sistema operando con las tres bombas en paralelo: Bombas 1, 3 y 5; registrando los valores de caudal y presión en la succión y descarga para cada posición de apertura de la válvula.

## 7 DESARROLLO DEL TRABAJO

El análisis será realizado a partir de la información y datos tomados directamente en el sistema de bombeo del Laboratorio de Hidráulica de la universidad y elaborando con esto, las curvas características H-Q de las tres bombas y del sistema de tuberías que se presentan en el capítulo 4.4. Los datos obtenidos en las pruebas realizadas, para cada posición de apertura de la válvula, fueron: Caudal descargado por el sistema y presión en la succión y en la descarga de cada bomba, y para cada condición de trabajo (trabajo de cada bomba individual y combinación de dos y tres bombas en paralelo). Con dicha información y conociendo los datos de las tuberías, se calcularon las velocidades en la succión y en la descarga, y se obtuvieron los valores de altura total que proporcionan las bombas, para cada posición de apertura de la válvula globo de la descarga común del sistema de bombeo, es decir, se obtienen los insumos para elaborar la Curva de altura total versus caudal de la bomba y del sistema.

### 7.1 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

La eficiencia máxima (BEP) original de la bomba que es presentada en la Figura 29, de acuerdo con las curvas del fabricante, para el tamaño de rodete que se encuentra actualmente instalado en las bombas (curva E – diámetro del rodete de 5 ½” pulgadas), estaría alrededor del 63%.

Los datos, mediciones y cálculos hidráulicos correspondientes, tomados directamente en el laboratorio, se encuentran en las tablas incluidas en el Anexo de este documento (Ver anexo 11.1 Datos tomados en el laboratorio).

En la Figura 34 se han superpuesto sobre la curva original del catálogo del fabricante de las bombas, las curvas H-Q actuales (obtenidas a partir de las mediciones realizadas en el sitio) para cada una de las tres bombas analizadas (véanse las curvas amarilla, azul y roja correspondientes, respectivamente, a las bombas 1, 2 y 3. La curva H-Q de color negro corresponde a la curva original del catálogo). En esta figura también se incluyen las curvas parabólicas ascendentes (que parten del origen) que corresponden a las

curvas de iso-eficiencia, que limitan el rango de puntos en que se puede operar la bomba, según lo estipulado en la norma ya indicada del Instituto de Hidráulica Americano (rango comprendido entre el -30% del Q nominal y el +20% del Q nominal) – véanse las curvas parabólicas ascendentes de color azul y rojo.

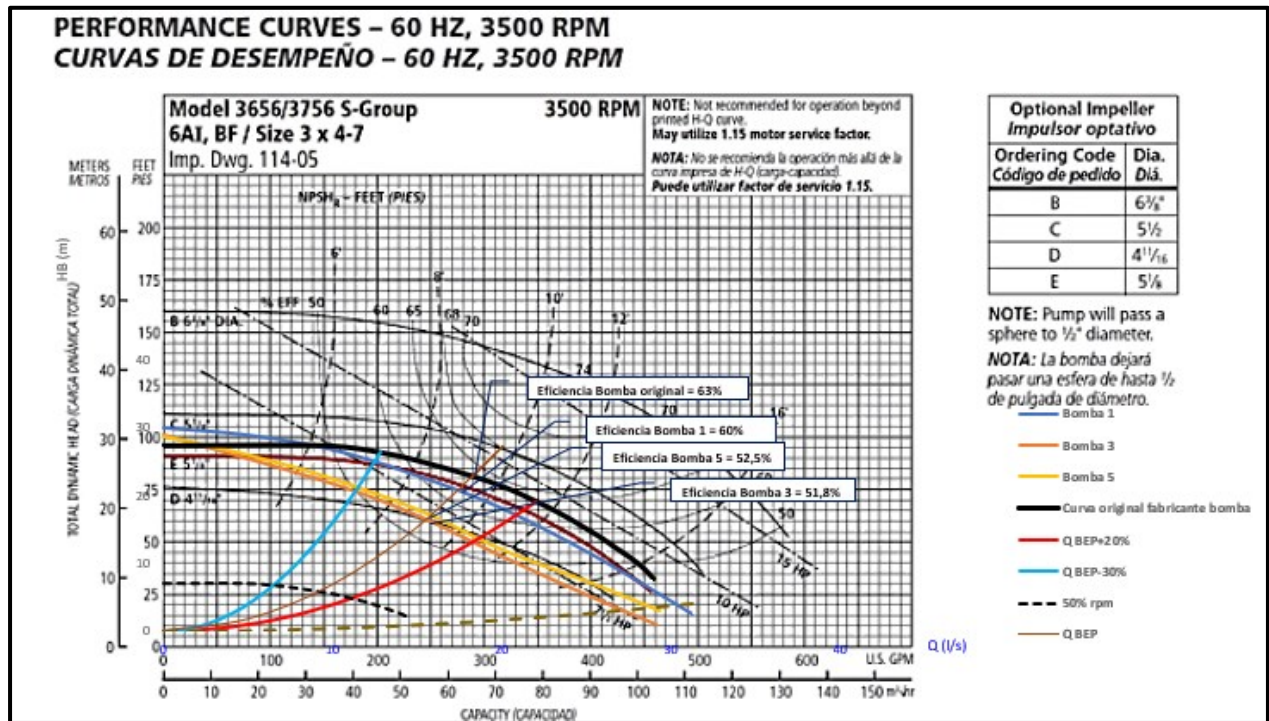


Figura 34: Curva de funcionamiento bombas analizadas superpuesta con las curvas de eficiencia del fabricante de la bomba. Información de la curva de funcionamiento de la bomba suministrada por el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT.

Como puede observarse a partir de la Figura 34, la bomba 1, en el punto de máxima eficiencia, estaría operando en el rango de 60% de eficiencia, que no es una variación sustancial respecto de la eficiencia original de la bomba, que representa una disminución del 4,7% respecto al valor original ( $1-60/63 = 4.7\%$ ), tal como se muestra en la Figura 34.

La bomba 3, en el punto de máxima eficiencia, estaría operando en el rango de 51,8% de eficiencia, una disminución del 17,8% respecto al valor original ( $1-51.8/63 = 17.8\%$ ), tal como se muestra en la Figura 34.

La bomba 5, en el punto de máxima eficiencia, estaría operando en el rango de 52,5% de eficiencia, que representa una disminución del 16,7% respecto al valor original ( $1 - 52.5/63 = 16.7\%$ ), tal como se muestra en la Figura 34.

Como se observa en la Tabla 3, la potencia estimada para la bomba original en el punto de máxima eficiencia es de 6,5 kW, para la bomba 1 actual es de 5,9 kW, para la bomba 5 es de 5,05 kW y para la bomba 3 es de 4,8 kW. Disminuciones del 9,3%, 22,3% y 26,3% respectivamente. Estos valores fueron obtenidos a partir de la siguiente ecuación para el cálculo de la potencia consumida por las bombas:

$$[(P) \text{ Bomba}] [kW] = Q \times H \times \rho \times g / (1000 \times \eta) \quad (16)$$

Donde,

$Q [m^3 / s]; H [m]; \rho [kg / m^3]; g = 9,81 [m / s^2];$

$\eta$ : para cada bomba en las diferentes condiciones de funcionamiento analizadas

En las siguientes tablas se resumen los resultados de potencia para cada condición analizada.

Tabla 3: Cálculo de potencia consumida por las bombas individuales en el punto de máxima eficiencia (BEP)

Condición de trabajo	Eficiencia Bomba	Q mín. recomendado (l/s)	HB para Q min (m)	Potencia consumida kW (HP)	Disminución de potencia por efecto del tiempo de trabajo (desgaste) (%)
Una sola bomba nueva individual	0,63	19,5	22,0	6,64 (8,9)	0
Bomba 1 individual	0,6	17,4	20,7	5,88 (7,9)	11,5%
Bomba 3 individual	0,518	15,8	17.4	5,2 (7,0)	21,8%

Condición de trabajo	Eficiencia Bomba	Q mín. recomendado (l/s)	HB para Q min (m)	Potencia consumida kW (HP)	Disminución de potencia por efecto del tiempo de trabajo (desgaste) (%)
Bomba 5 individual	0,525	15,5	16,8	4,8 (6,5)	27,1%

Tabla 4: Cálculo de potencia consumida por las bombas individuales en el punto mínimo de caudal permisible (-30%) según las normas HIS

Condición de trabajo	Eficiencia Bomba	Q mín. recomendado (l/s)	HB para Q min (m)	Potencia consumida kW (HP)	Disminución de potencia por efecto del tiempo de trabajo (desgaste) (%)
Una sola bomba nueva individual	0,55	12,6	27,4	6,2 (8,3)	0
Bomba 1 individual	0,54	12,4	25,3	5,7 (7,6)	7,9%
Bomba 3 individual	0,47	11,4	20,4	4,8 (6,5)	21,6%
Bomba 5 individual	0,47	11,4	20,4	4,8 (6,5)	21,6%

Tabla 5: Cálculo de potencia consumida por las bombas individuales en el punto máximo de caudal permisible (+20%) según las normas HIS

Condición de trabajo	Eficiencia Bomba	Q máx. recomendado (l/s)	HB para Q Max (m)	Potencia consumida (kW)	Disminución de potencia por efecto del tiempo de trabajo (desgaste) (%)
Una sola bomba nueva individual	0,62	22,1	19,2	6,7 (9,0)	0

Condición de trabajo	Eficiencia Bomba	Q máx. recomendado (l/s)	HB para Q Max (m)	Potencia consumida (kW)	Disminución de potencia por efecto del tiempo de trabajo (desgaste) (%)
Bomba 1 individual	0,60	20,8	17,4	5,9 (7,9)	11,9%
Bomba 3 individual	0,5	18,3	13,1	4,7 (6,3)	29,9%
Bomba 5 individual	0,5	18,3	13,1	4,7 (6,3)	29,9%

## **8 RESULTADOS**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con las mediciones tomadas en las pruebas realizadas para cada una de las bombas.

En el capítulo 9 se presentan algunas recomendaciones que se identifican una vez se compara el punto de funcionamiento en el que se encuentra el sistema cuando opera de manera individual, en paralelo con dos o con tres bombas.

La información se presenta de manera gráfica tomando como insumo los datos tomados en el laboratorio.

### **8.1.1 Comportamiento del sistema operando con las bombas de manera individual**

Se describe a continuación el comportamiento del sistema operando con las bombas de manera individual.

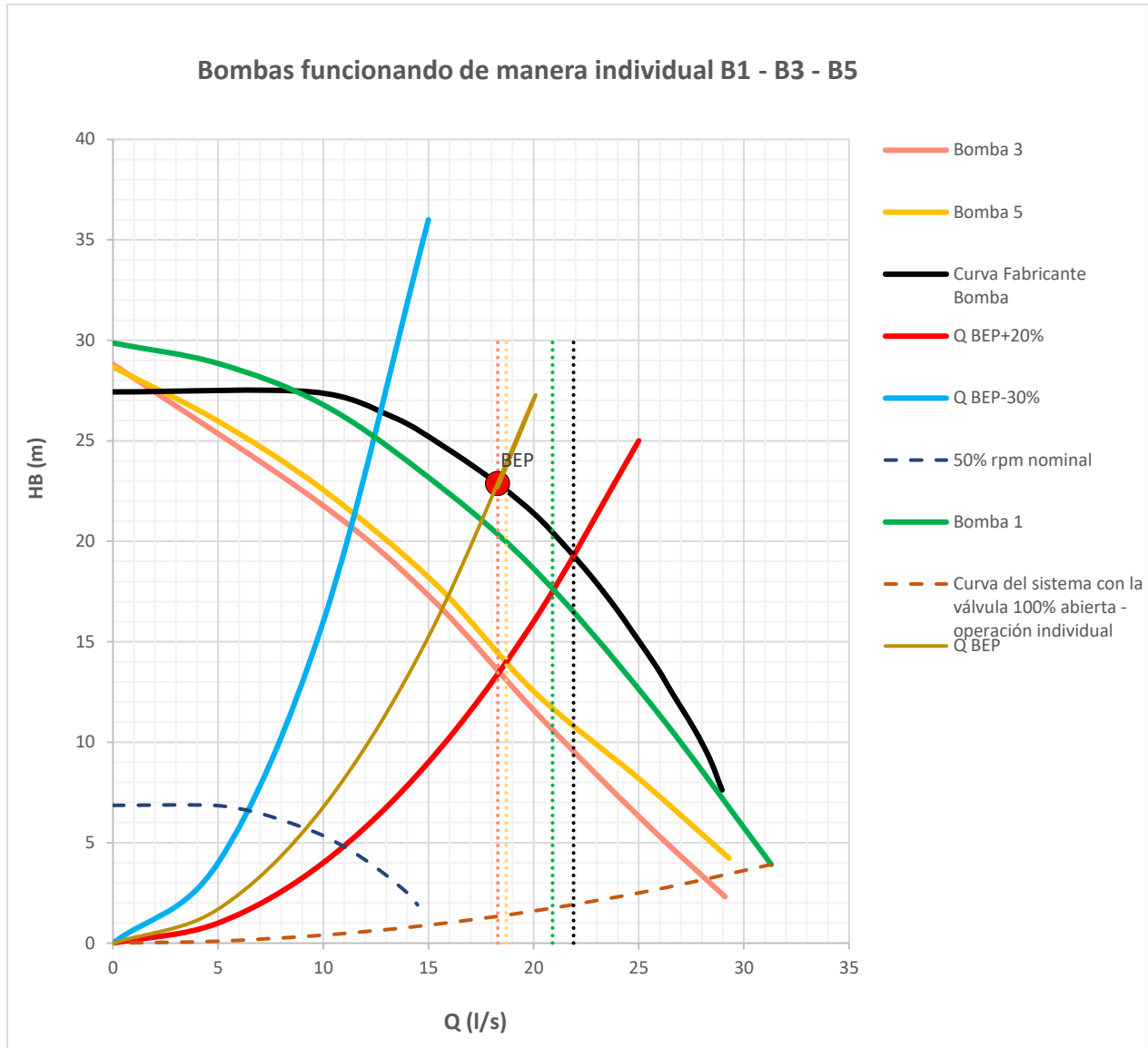


Figura 35: Comportamiento de las bombas trabajando de manera individual – Caudales máximos recomendables de operación. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas.

1. En la Figura 35 se puede apreciar que el punto de trabajo del sistema, con la válvula abierta al 100%, se encuentra muy lejos con respecto al punto de trabajo permitido (el punto de trabajo máximo permitido está identificado por los puntos de la curva de color rojo en la Figura 35, que corresponde a un caudal del 20% adicional al obtenido en el punto de máxima eficiencia de la bomba), es decir que no es recomendable operar la bomba en caudales que se encuentren hacia la derecha de la curva roja de la Figura 35. Por lo anterior, si se opera cualquiera de

las bombas 1, 3 o 5 de manera individual a su velocidad nominal, la válvula no debería estar totalmente abierta porque ello implicaría un deterioro acelerado en la bomba y el riesgo de que se presente cavitación durante su funcionamiento. El caudal máximo al que se recomienda operar una bomba nueva de iguales características es 22,1 l/s, para la bomba 1 el límite sería de 20,8 l/s, para la bomba 5 serían 18,7 l/s, y para la bomba 3 el límite sería de 18,3 l/s.

2. De manera similar a la recomendación para no operar las bombas con la válvula completamente abierta, en la Figura 36 también se observa que si se va a estrangular la válvula para reducir el caudal de las bombas, el caudal mínimo no podría ser inferior a 11,4 l/s para las bombas 3 y 5 de 12,3 l/s para la bomba 1 y 12,8 para una bomba nueva funcionando a su velocidad nominal, es decir, no se podrá operar a la izquierda de la curva de color azul, que corresponde a un caudal del -30% con respecto al caudal del punto de máxima eficiencia de la bomba (Figura 36) y que es el límite propuesto por el (Hydraulic Institute (ANSI/HI 3.1-3.5), 2015).

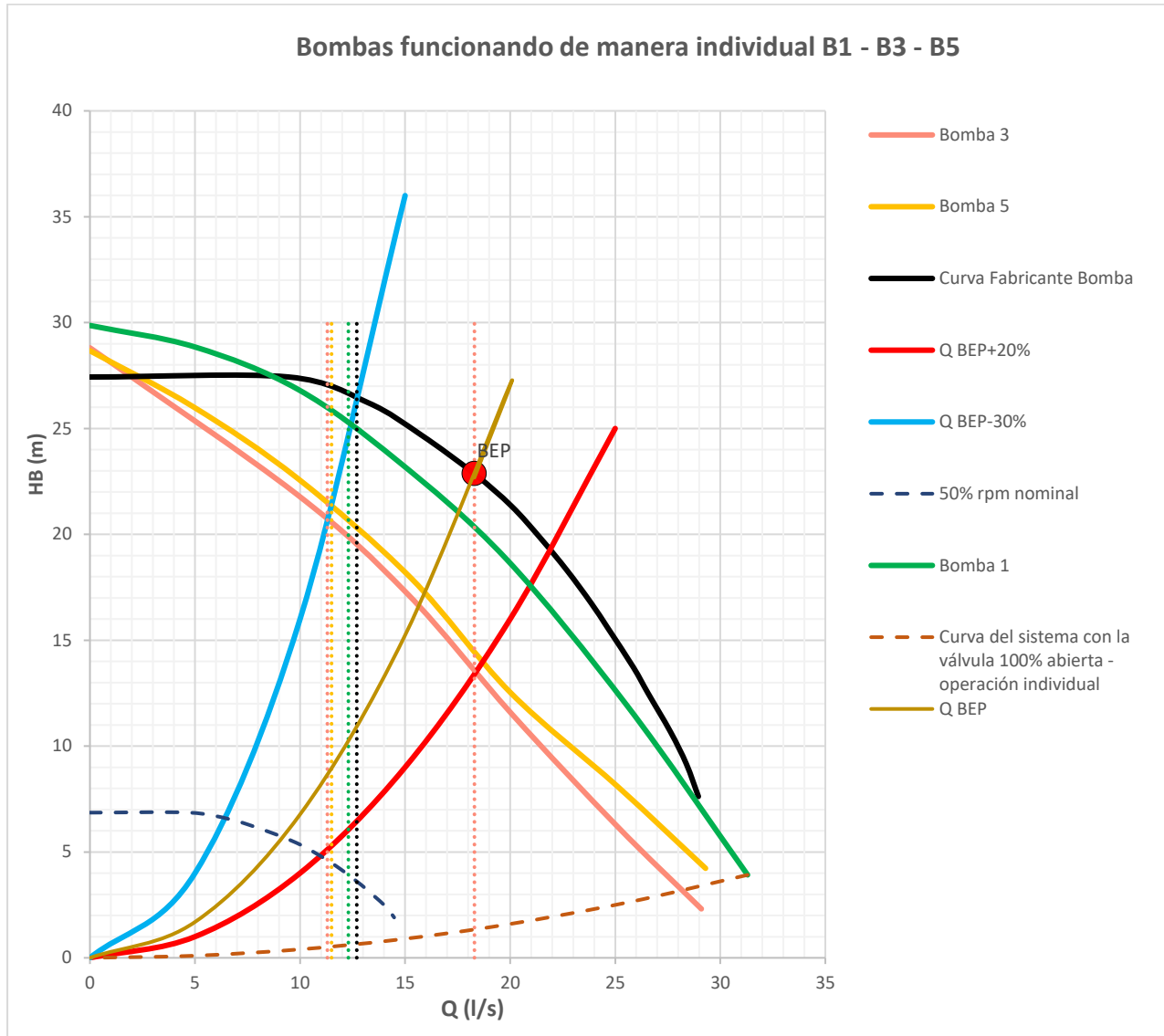


Figura 36: Comportamiento de las bombas trabajando de manera individual – Caudales mínimos recomendables de operación. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas.

3. Al comparar la curva original del fabricante de la bomba, con las curvas obtenidas para el comportamiento de las bombas 1, 3 y 5; se observa un mayor grado de deterioro en las bombas 3 y 5, que en la bomba 1, ya que las curvas de estas primeras se alejan un poco más de la curva original de la bomba.

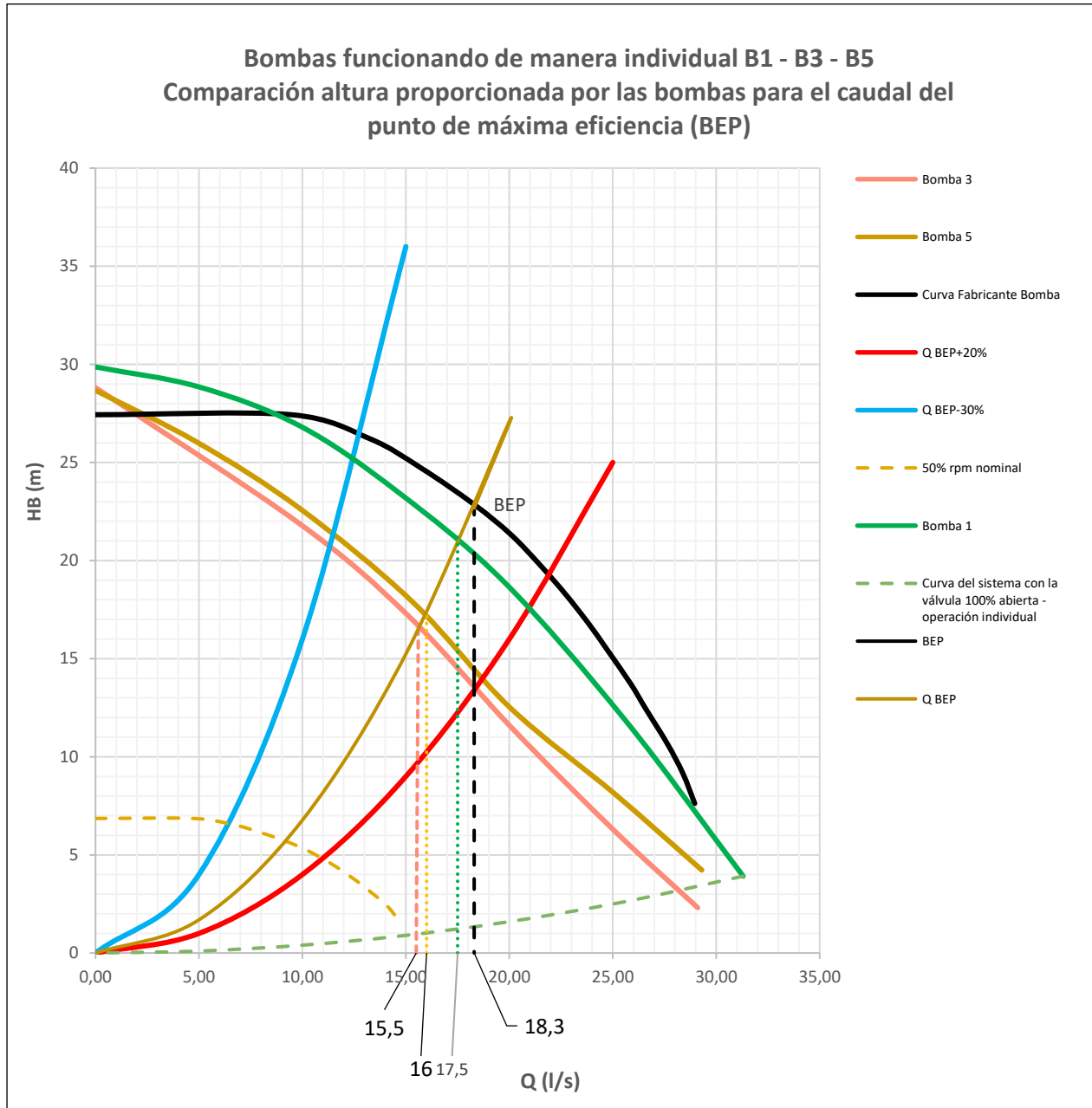


Figura 37: Comportamiento de las bombas trabajando de manera individual – comparación altura proporcionada por las bombas para el caudal del punto de máxima eficiencia (BEP). Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas.

De las mediciones y de las curvas obtenidas, a continuación en la Tabla 6 se presentan los valores de altura proporcionados por las bombas para el caudal en el punto de máxima eficiencia de la curva original del fabricante y para cada una de las bombas analizadas.

Tabla 6: Valores de altura y caudal proporcionados por las bombas para el caudal de máxima eficiencia de la curva original del fabricante y de cada bomba analizada

	<b>HB (m)</b>	<b>% variación H</b>	<b>QB (l/s)</b>	<b>% variación Q</b>
Curva original fabricante	22,86		18,3	
Bomba 1	22,29	-2,49%	17,5	-4,37%
Bomba 5	17,65	-22,79%	16	-12,57%
Bomba 3	16,88	-26,16%	15,5	-15,30%

### **8.1.1.1 Buenas prácticas de la ingeniería en materia de mantenimiento de bombas centrífugas en la industria por razones de productividad y consumos de energía**

1. Si el desfase en la variación de la altura entregada por la bomba con respecto al valor de la curva original es del orden del 5%, se recomienda una inspección interna para verificar el nivel de desgaste y posibles reparaciones o remplazos.
2. Si el desfase en el valor de la altura es del orden del 10%, generalmente implica un cambio de anillos de desgaste y una inspección del impulsor para verificar su nivel de desgaste.
3. Si el desfase en la altura es mayor del 10%, generalmente implica cambio de anillos de desgaste y del impulsor.

### **8.1.2 Comportamiento del sistema operando con dos bombas en paralelo (Bombas 1 y 3)**

En este numeral se incluyen las características encontradas en el sistema de bombeo cuando las bombas 1 y 3 trabajan en paralelo, además se presentan algunas conclusiones y recomendaciones en cuanto al punto de funcionamiento de cada una de las bombas.

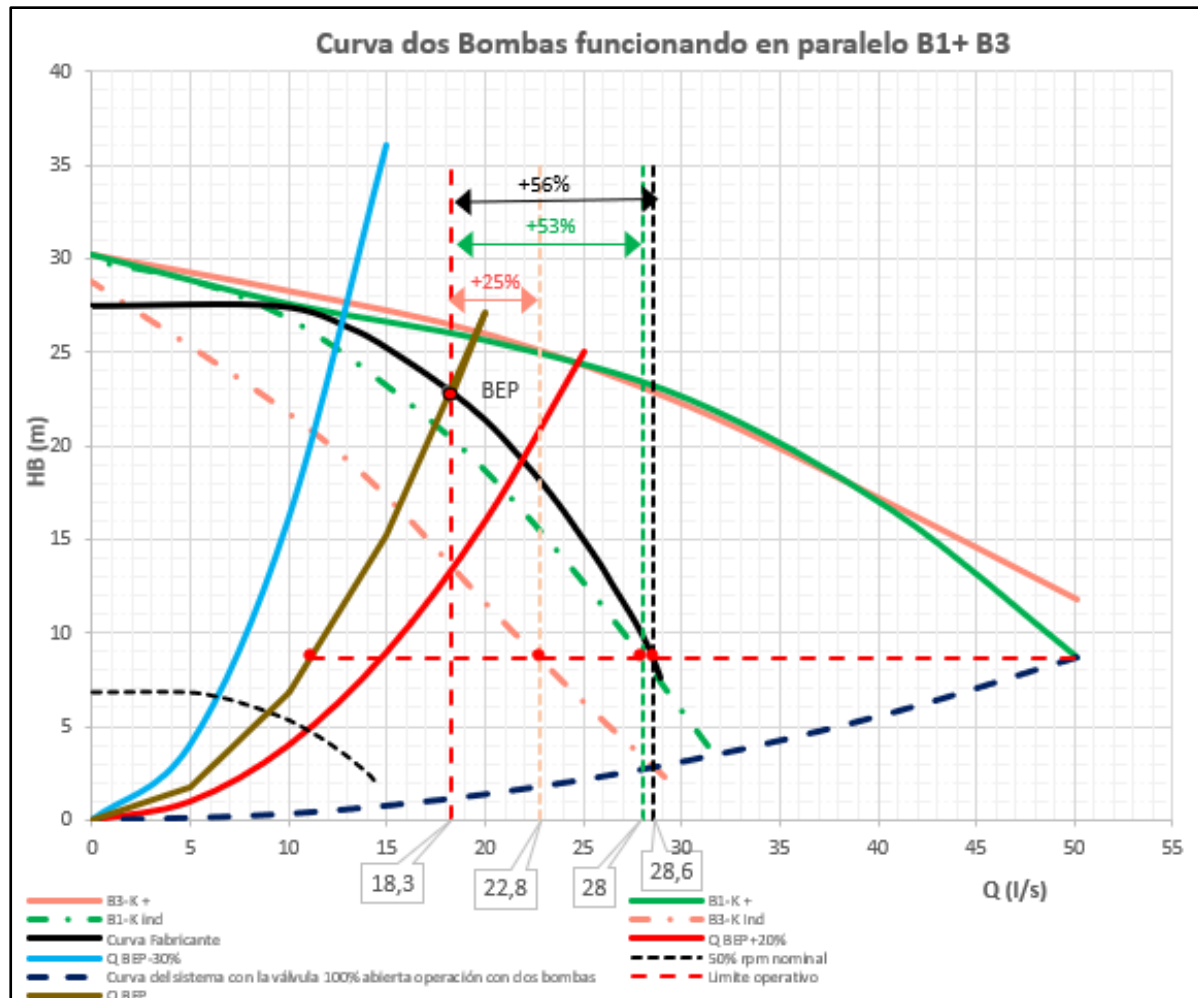


Figura 38: Comportamiento de las Bombas 1 y 3 trabajando en paralelo – punto de funcionamiento y deterioro acelerado de las bombas. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas.

En la Figura 38, a partir de la curva del sistema operando con dos bombas en paralelo, y con la válvula en la descarga completamente abierta, se proyecta el punto de trabajo de las bombas trabajando de manera individual y la curva original del fabricante de la bomba. De este análisis se encuentra que, si la bomba estuviera nueva y operando con la válvula en la descarga completamente abierta, al punto de funcionamiento le corresponde un caudal aproximado de 28,6 l/s; en las mismas condiciones, a la bomba 1 actual le corresponde un caudal de 28 l/s y a la bomba 3 un caudal de 22,8 l/s. Con estos valores y tal y como se observa en la Figura 38, el punto de máxima eficiencia se encuentra bastante alejado y se concluye lo siguiente:

1. Trabajar con la válvula 100% abierta y con dos bombas en paralelo, hace que cada una de las bombas trabaje en un punto que se aleja 56% del punto de máxima eficiencia, comparado con el 20% que es lo que recomiendan las normas del Instituto de Hidráulica (Hydraulic Institute (ANSI/HI 3.1-3.5), 2015) Esta condición de trabajo genera deterioro acelerado de las bombas.

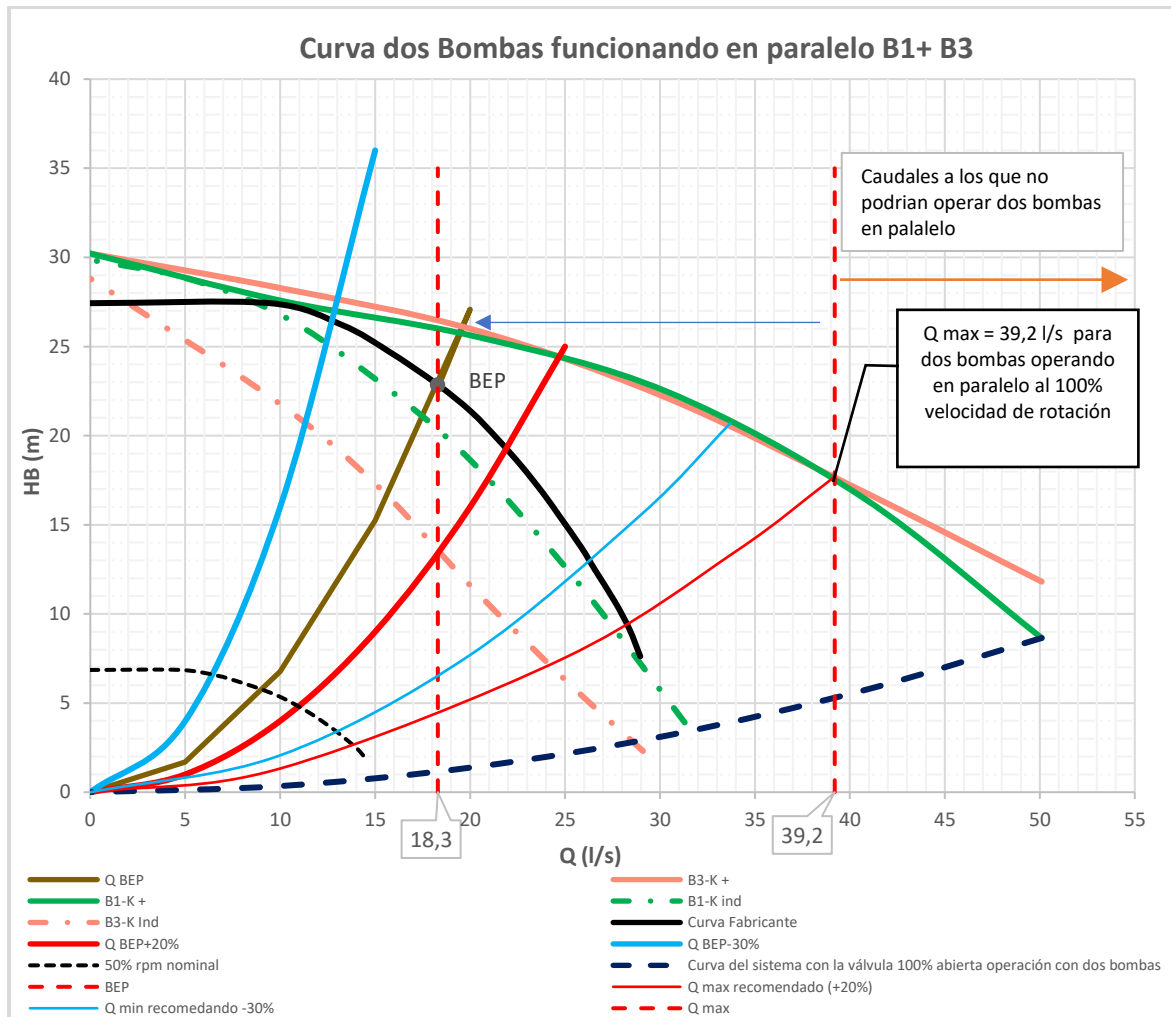


Figura 39: Comportamiento de las Bombas 1 y 3 trabajando en paralelo – punto de funcionamiento con alta eficiencia. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas.

En la Figura 39, interceptando la curva que corresponde a los caudales del +20% del punto de máxima eficiencia con la curva del sistema operando con dos bombas en paralelo, se encuentra el límite al que podrían operar las bombas en esta condición, que para el sistema analizado le corresponde un caudal de 39,2 l/s y se concluye lo siguiente:

2. Cuando operan dos bombas en paralelo, la válvula en la descarga debe ser estrangulada para obtener un caudal máximo aproximado de 39,2 l/s, esto con el fin de garantizar que las bombas trabajen a alta eficiencia y por ende obtener un adecuado consumo energético.

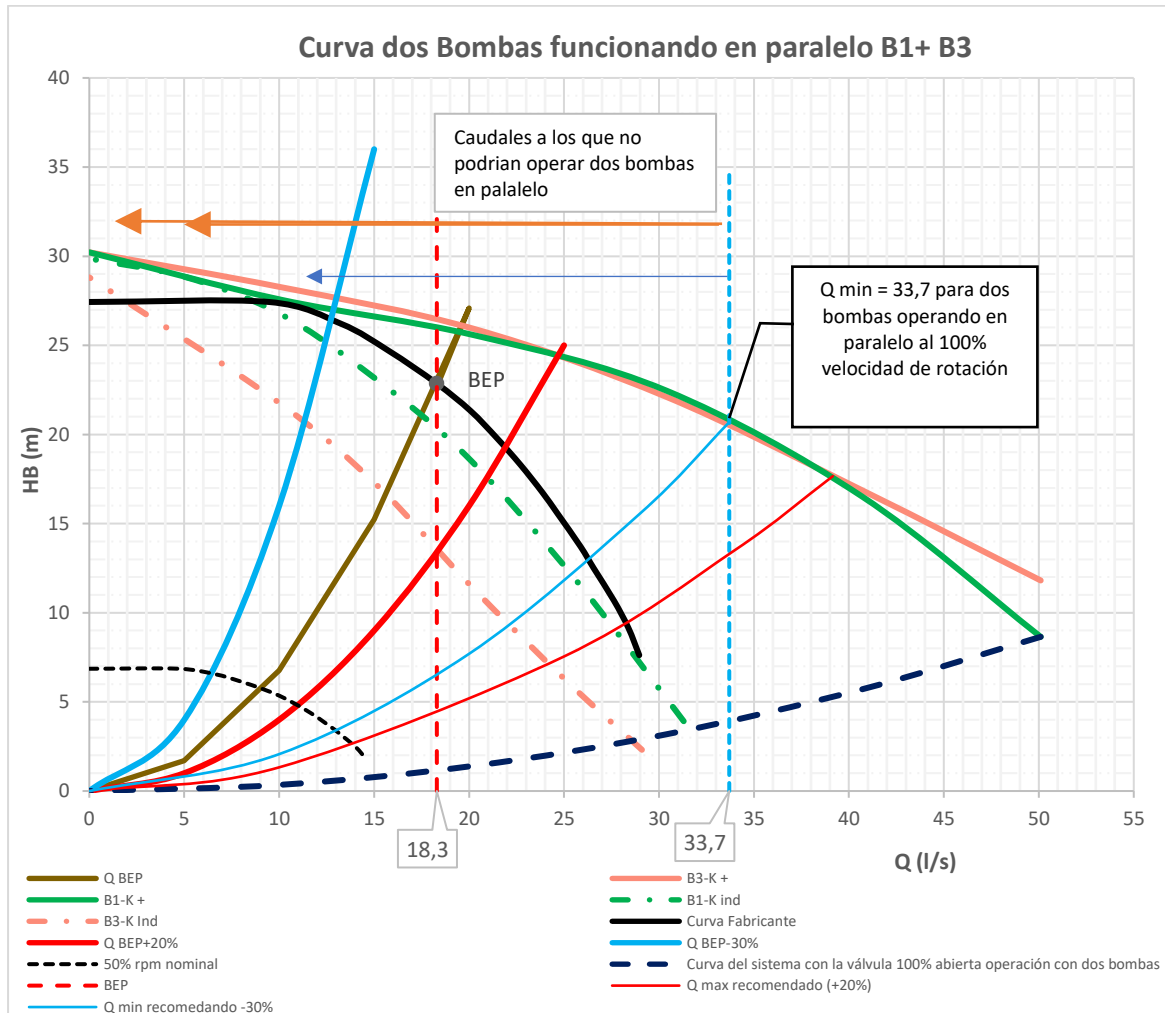


Figura 40: Caudal del sistema para dos bombas trabajando en paralelo. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas.

De manera similar al análisis anterior, de la Figura 40 donde se incluye el caudal mínimo de operación recomendado por el (Hydraulic Institute ANSI/HI 6.1-6.5), puede concluirse que el caudal mínimo de operación del sistema cuando está operando con dos bombas en paralelo es de 33,7 l/s.

### 8.1.3 Comportamiento del sistema operando con tres bombas en paralelo (Bombas 1, 3 y 5)

En este numeral se incluyen las características encontradas en el sistema de bombeo cuando las tres bombas 1, 3 y 5 trabajan en paralelo, además se presentan algunas conclusiones y recomendaciones en cuanto al punto de funcionamiento de cada una de las bombas.

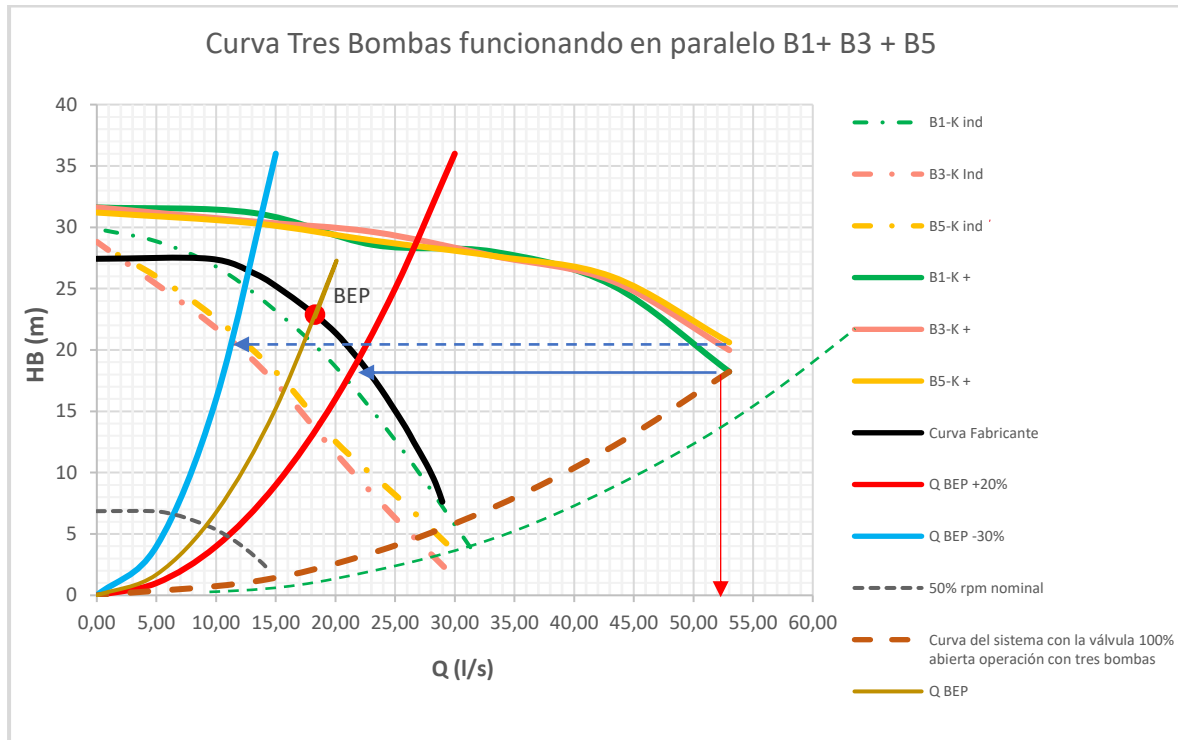


Figura 41: comportamiento del sistema operando con tres bombas en paralelo y la válvula completamente abierta. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas.

En la Figura 41 se puede observar el comportamiento de las tres bombas cuando operan en paralelo y con la válvula en la descarga completamente abierta, se incluyen en líneas punteadas las curvas de funcionamiento de las bombas trabajando de manera individual. De este análisis se puede concluir lo siguiente:

1. Si se va a operar el sistema con las tres bombas en paralelo, la válvula en la descarga puede estar abierta completamente puesto que, de manera general, los caudales se encuentran muy cercanos del rango de funcionamiento recomendado por el instituto de hidráulica (Hydraulic Institute (ANSI/HI 3.1-3.5), 2015) y que

corresponde a la zona comprendida entre las curvas azul y roja de la parte izquierda de la Figura 41. El caudal máximo que se recomienda bombear con tres bombas en paralelo y la válvula completamente abierta es de 51.8 l/s (flecha de color rojo).

2. Para operación con tres bombas en paralelo, no se recomienda estrangular la válvula, pues el caudal entregado por las bombas individuales podría estar por debajo del caudal mínimo individual recomendado por las normas (-30%). Por este motivo, en este caso se debe operar con la válvula completamente abierta.

## **9 CONCLUSIONES**

A partir de la información tomada en las pruebas realizadas en el sistema de bombeo, con la información recopilada y con los análisis que se presentan en el desarrollo de este documento, a continuación se incluyen las conclusiones:

En el capítulo 4 de este documento se incluye el marco teórico aplicable a sistemas de bombeo, se describen también las principales variables que influyen en el funcionamiento de sistemas de bombeo, se hace una descripción de las curvas características de las bombas centrífugas que fueron el medio para el desarrollo del caso práctico real y finalmente se incluyen los principales conceptos relacionados con los efectos de las pérdidas de eficiencia en bombas centrífugas.

En el desarrollo de este trabajo se recopila la información analizada de la estación de bombeo del laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT, que cuenta con un sistema de bombeo conformado por seis bombas centrífugas, la descripción de este sistema se presenta en el capítulo 6 al igual que el procedimiento realizado para obtener las mediciones. El análisis de las condiciones actuales de funcionamiento se incluye en el capítulo 7 y los resultados obtenidos en el capítulo 8.

### **9.1 DIFERENCIAS ENTRE LA CONDICIÓN DE DESEMPEÑO ORIGINAL Y ACTUAL DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO ANALIZADA**

1. La Bomba 1 presenta un comportamiento muy cercano a la curva original de fábrica.
2. El comportamiento de las bombas 3 y 5 se aleja de la curva del fabricante, por lo que se puede inferir que estas dos últimas bombas (3 y 5), presentan un deterioro marcado y se recomienda revisar e inspeccionar los anillos de desgaste (e impulsores), y si es del caso, cambiarlos por unos nuevos, de esta manera se podría retornar a una curva de desempeño H-Q muy similar a la original, y se mejoraría sustancialmente la eficiencia del equipo.

3. Todas las bombas analizadas presentan una curva H-Q actual muy distante con respecto a la curva H-Q del fabricante (Véase la Figura 34: Curva de funcionamiento bombas analizadas superpuesta con las curvas de eficiencia del fabricante de la bomba.), lo anterior debido al tiempo de uso de las bombas y al deterioro que esto conlleva. De esta manera se encuentran disminuciones del orden del 17% en la eficiencia en las bombas 3 y 5 y del 5% en la bomba 1.
4. Las bombas 3 y 5 presentan un mayor deterioro que la bomba 1. No obstante, la bomba 1 también presenta un deterioro apreciable. La altura total suministrada actualmente por estas bombas presenta disminuciones por encima del 4% (bomba 1), 12% (bomba 5) y 15% (bomba3), por lo tanto, se recomienda la inspección interna de estas bombas: impulsores, carcasas y anillos de desgaste, como se indicó en el numeral 8.1.1.1.

## 9.2 RECOMENDACIÓN DE LOS CAUDALES MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE OPERACIÓN DE LAS BOMBAS ANALIZADAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA Y EL CONSUMO ENERGÉTICO

A continuación, en la Tabla 7 se presenta un resumen de las recomendaciones en cuanto a los caudales mínimos y máximos de operación recomendados para cada bomba analizada trabajando de manera individual.

*Tabla 7: Mejoras recomendadas para optimización energética – Caudales mínimos y máximos de operación recomendados para cada bomba en la condición actual*

Condición de trabajo	Q mín. recomendado (l/s)	Caudal máximo recomendado (l/s)
Una sola bomba nueva individual	12,83	22,1
Bomba 1 individual	12,3	20,8
Bomba 3 individual	11,4	18,3
Bomba 5 individual	11,4	18,7

Partiendo de los datos gráficos suministrados por el fabricante de la bomba y superponiendo las curvas de operación individual de cada bomba tal y como se indica en la Figura 34, se encuentran los valores de eficiencia de la bomba original y de cada condición de trabajo analizada, estos valores se presentan en la Tabla 8 y fueron mencionados en el numeral 7.1 Análisis de la situación actual.

*Tabla 8: Eficiencia bombas analizadas en el punto en el punto de máxima eficiencia (BEP)*

Eficiencia original bomba BEP	0,63
Eficiencia en el BEP Bomba 1	0,6
Eficiencia en el BEP Bomba 3	0,518
Eficiencia en el BEP Bomba 5	0,525

A partir de lo ilustrado en la Figura 35, el caudal máximo al que se recomienda operar una bomba nueva de iguales características es 22,1 l/s, para la bomba 1 el límite sería de 20,8 l/s, para la bomba 5 serían 18,7 l/s y para la bomba 3 de 18,3 l/s. De manera similar, en la Figura 36 se observa que el caudal mínimo no podría ser inferior a 11,4 l/s para las bombas 3 y 5 de 12,3 l/s para la bomba 1 y de 12,8 para una bomba nueva funcionando a su velocidad nominal.

Para operación del sistema con tres bombas en paralelo, la válvula de descarga puede estar en una posición completamente abierta. Para operación de tres bombas en paralelo, debe tenerse cuidado de no estrangular demasiado la válvula ya que el caudal mínimo que se recomienda bombear en este caso es de 51,8 l/s (ver Figura 41).

A continuación, en la Figura 42 se presentan de manera simultánea las curvas de funcionamiento en paralelo de las bombas originales.

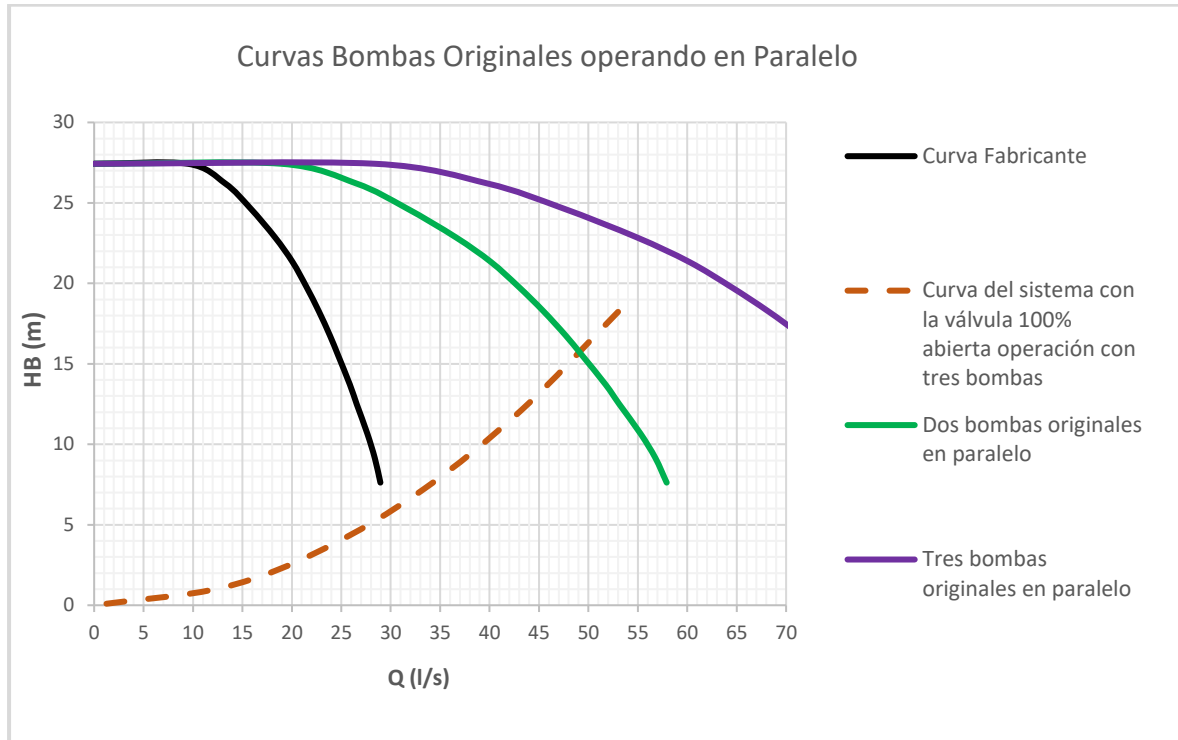


Figura 42: Curva bombas originales operando en paralelo. Elaboración propia a partir de la información tomada en las pruebas realizadas.

### 9.3 RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE LAS BOMBAS ANALIZADAS Y DISMINUIR EL CONSUMO DE ENERGÍA

1. Se recomienda inspeccionar internamente los impulsores y carcasas para verificar su condición de desgaste.
2. Con base en lo indicado en el párrafo anterior, también desde el punto de vista de consumo de potencia, sería conveniente un cambio de impulsores para obtener nuevamente la curva H-Q original y mejorar la eficiencia en el punto de máxima eficiencia (BEP= 63%).
3. Eficiencia de las bombas analizadas

Al calcular la velocidad específica de las bombas originales haciendo uso de la ecuación (6), se obtiene:

$$n_s = \frac{n(Q)^{0,5}}{(H)^{0,75}} = 2486 \cong 2500 \text{ en unidades inglesas (Q en gpm): n en rpm; H en ft)}$$

Donde,

$n_s$  ( $N_s$ ) = Velocidad específica

$n$  = Velocidad rotativa = 3500 rpm

$Q$  = Caudal total de la bomba = 70 m<sup>3</sup>/h = 19,5 l/s = 308 [gal/min]

$H$  = Altura de cada etapa de la bomba = 72 [ft] = 22 m. c. a

*Eficiencia = 63% leída del catálogo original*

*Eficiencia máxima predecible a partir de la Figura 20 = 75%*

Con el resultado obtenido de velocidad específica se concluye que la bomba utilizada ofrece una eficiencia en el punto de máxima eficiencia (BEP) muy inferior a lo que podría lograrse utilizando otra bomba de igual caudal, altura total y velocidad de rotación (rpm), (63% Vs 75%), pero que utilice un impulsor cuyo diámetro corresponda al diámetro máximo que puede acoplarse dentro de la carcasa de la bomba. Obsérvese que el rodete utilizado por la bomba actual es de 5 ½" cuando el diámetro máximo que puede acoplarse en la carcasa de esta bomba es sustancialmente mayor (es de 6 ½"), con lo cual la eficiencia de la bomba se ve fuertemente disminuida, y como consecuencia su consumo de potencia es mayor al que podría tenerse con un impulsor más ajustado a la carcasa de la bomba.

4. A partir de lo ilustrado en la Tabla 3, se encuentra que la potencia consumida individualmente por las bombas en el punto de máxima eficiencia ha ido disminuyendo gradualmente por efecto del tiempo de trabajo y el desgaste asociado, hasta un punto tal que la disminución máxima la presenta la bomba 5 con un porcentaje de 27,1% de disminución. Esta reducción en el consumo de potencia se explica por la disminución que se produce en el caudal bombeado como consecuencia de que la curva H-Q de la bomba se ha ido alejando con respecto a la curva original. Esta misma causa explica la disminución de potencia presentada en la Tabla 4 y en la Tabla 5 para el caso de operación a los caudales mínimo y máximo permisibles según las normas del instituto de hidráulica.

5. Para operación con dos bombas en paralelo, la válvula en la descarga no se debe abrir al 100%, pues pondría a operar las bombas en un punto perjudicial que aceleraría su deterioro, además de que el consumo de potencia sería muy alto. En este caso la válvula en la descarga debe ser estrangulada para obtener un caudal máximo aproximado de 39,2 l/s, esto con el fin de garantizar que las bombas trabajen a alta eficiencia y por ende obtener un adecuado consumo energético (ver Figura 39). De manera similar, para operación de dos bombas en paralelo, la válvula en la descarga no puede estrangularse tanto que el caudal total bombeado con el sistema en paralelo sea inferior a 33,7 l/s (ver Figura 40).

## 10 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Audisio, O. (s.f.). *Bombas Utilizadas como turbinas*. Obtenido de <https://carlosmartinezc.files.wordpress.com/2012/01/bombcomo-turb.pdf>

*Bomba centrífuga*. (s.f.). Obtenido de Bomba centrífuga: <https://prezi.com/k31hxpczqf1t/bomba-centrifuga/?frame=b0e1332fdae0a67c3c5f60c2372d7247c308bb10>

Bombas Zeda Pump Manufacturer. (s.f.). <https://bombaszeda.com/>. Obtenido de <https://bombaszeda.com/>: [https://bombaszeda.com/wp-content/uploads/2018/04/Es\\_4Manometrica.pdf](https://bombaszeda.com/wp-content/uploads/2018/04/Es_4Manometrica.pdf)

Borrero Restrepo, A. A., & Gíl León, C. A. (1995). *Bombas Centrífugas*. Santiago de Cali.

Duarte Martínez , H. E., & Moran Tapia , D. A. (6 de septiembre de 2019). *Algunos tipos de bombas rotativas*. Tomado de (Montoya Sánchez, 2016) y. Obtenido de Algunos tipos de bombas rotativas. Tomado de (Montoya Sánchez, 2016) y: [https://prezi.com/p/io6ex1\\_nvzlk/introduccion-y-clasificacion-de-bombas/?frame=e6a6ba6197668d05016f417f245e6359455181c3](https://prezi.com/p/io6ex1_nvzlk/introduccion-y-clasificacion-de-bombas/?frame=e6a6ba6197668d05016f417f245e6359455181c3)

Eficiencia Energética Industrial en Colombia. (Octubre de 2018). *Manual de optimización de sistemas de bombeo*. Obtenido de [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/EEIColombia/Manual\\_sistemas\\_bombeo.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/EEIColombia/Manual_sistemas_bombeo.pdf)

*HI 14-6b Rotodynamic Pumps for Hydraulic Performance Tests*. (s.f.).

Hydraulic Institute (ANSI/HI 3.1-3.5). (2015). *Rotary Pumps for Nomenclature, Definitions and Operation*. Estados Unidos: Hydraulic Institute, Inc.

Hydraulic Institute (ANSI/HI 6.1-6.5). (s.f.). *Reciprocating Pumps for Nomenclature, Definitions and Operation*. Estados Unidos: Hydraulic Institute, Inc.

Hydraulic Institute (ANSI/HI 7.1-7.5). (s.f.). *Controlled-Volume Metering Pumps for Nomenclature, Definitions and Operation*. Estados Unidos: Hydraulic Institute, Inc.

Hydraulic Institute ANSI/HI 10.1-10.5. (s.f.). *Air-Operated Pumps for Nomenclature, Definitions and Operation*. Estados Unidos: Hydraulic Institute, Inc.

Hydraulic Institute ANSI/HI 14.1-14.2. (2019). *Rotodynamic Pumps for Nomenclature and Definitions (ANSI/HI 14.1-14.2-2019)*. Estados Unidos: Hydraulic Institute, Inc.

Hydraulic Institute ANSI/HI 6.1-6.5. (s.f.). *Reciprocating Pumps for Nomenclature, Definitions and Operation*. Estados Unidos: Hydraulic Institute, Inc.

Ippen, A. T. (1946). The Influence of Viscosity on Centrifugal Pump Performance. En *ASME*, 68 (8).

Jiménez Mur, J. (s.f.). *Tipos de bombas de desplazamiento positivo*. Obtenido de <https://pumpsbombas.com/tutorial-tipos-bombas-desplazamiento-positivo/>

Jiménez Mur, J. (s.f.). *Tipos de bombas de desplazamiento positivo*. Obtenido de Tipos de bombas de desplazamiento positivo: <https://pumpsbombas.com/tutorial-tipos-bombas-desplazamiento-positivo/>

Jiménez Mur., J. (s.f.). *Tipos de bombas rotodinámicas*. Obtenido de <https://pumpsbombas.com/tutorial-tipos-bombas-rotodinamicas/>

Karassik, I., Messina, J., Cooper, P., & Heald, C. (2006). *Pump Handbook: Third Edition*. McGRAW-HILL New.

Liquim Ingeniería. (17 de Julio de 2020). *Diagnóstico, optimización energética y caracterización de sistemas de bombeo*. . Obtenido de Liquim Ingeniería: [www.liquim.com](http://www.liquim.com)

Montoya Sánchez, G. A. (8 de Noviembre de 2016). *Bombas de Desplazamiento Positivo*. Obtenido de Bombas de Desplazamiento Positivo: <https://prezi.com/hdunqdxiasqb/bombas-de-desplazamiento-positivo/?frame=5863c4303076f59bc739b0244b706ca04dbf158d>

Quirós Morales, L. F. (s.f.). *Bombas y sistemas de bombeo*. Medellín.

Saba, Y. P. (s.f.). *Bomba centrífuga de flujo axial*. Obtenido de <https://prezi.com/1ct3agapksex/bomba-centrifuga-de-flujo-axial/?frame=37315df67382ad6646ee3e5b669e324e8dcffdc0>

Soriano, J. A. (2011). *Bombas Hidráulicas*.

Universidad de Valencia - Laboratorio de Operaciones Básicas en Procesos Biotecnológicos. (s.f.).

[https://www.uv.es/idiqlab/labOBPB/documentos/Bomba\\_centrifuga\\_OBPB.pdf](https://www.uv.es/idiqlab/labOBPB/documentos/Bomba_centrifuga_OBPB.pdf).

Obtenido de Determinación de las características de una bomba centrífuga (Documento para la realización de la práctica de laboratorio de bomba centrífuga):

[https://www.uv.es/idiqlab/labOBPB/documentos/Bomba\\_centrifuga\\_OBPB.pdf](https://www.uv.es/idiqlab/labOBPB/documentos/Bomba_centrifuga_OBPB.pdf)

Vazquez Bedolla, E. I., González Lozano, F. A., Gómez Badillo, S., Ciprés Esquivel, L. A., & Romero Gutierrez, J. L. (s.f.). *BOMBAS CENTRIFUGAS*. Obtenido de BOMBAS CENTRIFUGAS: <https://prezi.com/gtinpj-2bt7k/bombas-centrifugas/?frame=3319d47084cc9a40d457455ac1ae80759d2e588a>

Wikipedia. (13 de enero de 2008). *Bomba Centrífuga*. Obtenido de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Centrifugal\\_Pump\\_es.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Centrifugal_Pump_es.jpg)

Wikipedia. (05 de septiembre de 2010). *Bomba centrífuga*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Bomba\\_centric%C3%ADfuga#/media/Archivo:Centrifugal\\_4.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_centric%C3%ADfuga#/media/Archivo:Centrifugal_4.png)

Wikipedia® . (12 de 22 de 2020). Obtenido de Wikipedia® : [https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama\\_de\\_Moody](https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Moody)

## 11 ANEXO

### 11.1 DATOS TOMADOS EN EL LABORATORIO DURANTE LAS PRUEBAS REALIZADAS EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD EAFIT LOS DÍAS 2 Y 3 DE DICIEMBRE DE 2021.

Tabla 9: Datos tomados con la Bomba 1 trabajando de manera individual

Bomba 1 Trabajando de manera individual								
Posición Válvula	Q (l/s) Medidor Krohne (anillo GRP arriba)	Ps1 (psi)	Pd1 (psi)	Vs (m/s)	Vd (m/s)	Vs <sup>2</sup> /sg (m)	Vd <sup>2</sup> /sg (m)	HB (m)
Abierta	31,30	2,50	6,00	3,81	6,56	0,74	2,20	3,92
	25,60	2,50	18,00	3,12	5,37	0,50	1,47	11,87
	19,80	3,00	29,00	2,41	4,15	0,30	0,88	18,85
	14,60	3,00	36,00	1,78	3,06	0,16	0,48	23,51
	9,90	3,00	41,00	1,21	2,08	0,07	0,22	26,85
Cerrada	5,00	3,00	44,00	0,61	1,05	0,02	0,06	28,85
	0,00	3,50	46,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,87

Tabla 10: Datos tomados con la Bomba 3 trabajando de manera individual

Bomba 3 Trabajando de manera individual								
Posición Válvula	Q (l/s) Medidor Krohne (anillo GRP arriba)	Ps3 (psi)	Pd3 (psi)	Vs (m/s)	Vd (m/s)	Vs <sup>2</sup> /sg (m)	Vd <sup>2</sup> /sg (m)	HB (m) Medidor Krohne
Abierta	29,10	2,50	4,00	3,54	6,10	0,64	1,90	2,31
	25,10	2,50	10,00	3,06	5,26	0,48	1,41	6,21
	20,10	2,50	18,00	2,45	4,22	0,31	0,91	11,49
	15,10	3,00	27,00	1,84	3,17	0,17	0,51	17,20
	9,80	3,00	34,00	1,19	2,06	0,07	0,22	21,93
Cerrada	0,00	3,00	44,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,81

Tabla 11: Datos tomados con la Bomba 5 trabajando de manera individual

Bomba 5 Trabajando de manera individual								
Posición Válvula	Q (l/s) Medidor Krohne (anillo GRP arriba)	Ps5 (psi)	Pd5 (psi)	Vs (m/s)	Vd (m/s)	Vs <sup>2</sup> /sg (m)	Vd <sup>2</sup> /sg (m)	HB (m) Medidor Krohne
Abierta	29,30	2,80	7,00	3,57	6,14	0,65	1,92	4,23
	25,10	2,80	13,00	3,06	5,26	0,48	1,41	8,10
	20,00	3,00	20,00	2,44	4,19	0,30	0,90	12,54
	15,30	3,00	28,00	1,86	3,21	0,18	0,52	17,92
	9,90	3,00	35,00	1,21	2,08	0,07	0,22	22,63
	4,90	3,00	40,00	0,60	1,03	0,02	0,05	26,04
Cerrada	0,00	3,20	44,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,67

Tabla 12: Datos tomados con las Bombas 1 y 3 trabajando en paralelo

Bomba 1 + Bomba 3 en paralelo				Bomba 1 trabajando en paralelo con la Bomba 3				
Posición Válvula	Q (l/s) Medidor Krohne (anillo GRP arriba)	Ps1 (psi)	Pd1 (psi)	Vs (m/s)	Vd (m/s)	Vs <sup>2</sup> /sg (m)	Vd <sup>2</sup> /sg (m)	HB1 (m) Medidor Krohne
Abierta	50,10	2,00	9,00	6,10	10,51	1,90	5,63	8,65
	40,70	2,00	22,00	4,96	8,54	1,25	3,71	16,52
	30,40	2,00	32,00	3,70	6,38	0,70	2,07	22,45
	20,30	2,50	38,00	2,47	4,26	0,31	0,92	25,56
	10,10	3,00	42,00	1,23	2,12	0,08	0,23	27,56
Cerrada	0,00	3,00	46,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,22

Tabla 13: Datos tomados con las Bombas 1 y 3 trabajando en paralelo

Bomba 1 + Bomba 3 en paralelo				Bomba 3 Trabajando en paralelo con la Bomba 1						
Posición Válvula	Q (l/s) Medidor Krohne (anillo GRP arriba)	Ps1 (psi)	Pd1 (psi)	Ps3 (psi)	Pd3 (psi)	Vs (m/s)	Vd (m/s)	Vs <sup>2</sup> /sg (m)	Vd <sup>2</sup> /sg (m)	HB3 (m) Medidor Krohne
Abierta	50,10	2,00	9,00	2,50	14,00	6,10	10,51	1,90	5,63	11,81
	40,70	2,00	22,00	2,50	23,00	4,96	8,54	1,25	3,71	16,87
	30,40	2,00	32,00	2,50	32,00	3,70	6,38	0,70	2,07	22,10
	20,30	2,50	38,00	3,00	39,00	2,47	4,26	0,31	0,92	25,91
	10,10	3,00	42,00	3,00	43,00	1,23	2,12	0,08	0,23	28,26
Cerrada	0,00	3,00	46,00	3,00	46,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,22

Tabla 14: Datos tomados con las Bombas 1, 3 y 5 trabajando en paralelo

Bomba 1 + Bomba 3 + Bomba 5 en paralelo		Bomba 1 Medidor Krohne trabajando en paralelo con las Bombas 3 y 5						
Posición Válvula	Q (l/s) Medidor Krohne (anillo GRP arriba)	Ps1 (psi)	Pd1 (psi)	Vs (m/s)	Vd (m/s)	Vs <sup>2</sup> /sg (m)	Vd <sup>2</sup> /sg (m)	HB1 (m) Medidor Krohne
Abierta	53,00	2,00	22,00	6,45	11,11	2,12	6,30	18,23
	43,20	2,00	34,00	5,26	9,06	1,41	4,18	25,26
	33,30	2,50	40,00	4,05	6,98	0,84	2,49	28,00
	23,20	2,50	42,00	2,82	4,87	0,41	1,21	28,56
	13,10	2,00	46,00	1,60	2,75	0,13	0,38	31,17
Cerrada	0,00	3,00	48,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,62

Tabla 15: Datos tomados con las Bombas 1, 3 y 5 trabajando en paralelo

Bomba 1 + Bomba 3 + Bomba 5 en paralelo		Bomba 3 Medidor Krohne trabajando en paralelo con las Bombas 1 y 5						
Posición Válvula	Q (l/s) Medidor Krohne (anillo GRP arriba)	Ps3 (psi)	Pd3- (psi)	Vs (m/s)	Vd (m/s)	Vs <sup>2</sup> /sg (m)	Vd <sup>2</sup> /sg (m)	HB3 (m) Medidor Krohne
Abierta	53,00	2,50	25,00	6,45	11,11	2,12	6,30	19,98
	43,20	2,50	35,00	5,26	9,06	1,41	4,18	25,61
	33,30	3,00	40,00	4,05	6,98	0,84	2,49	27,65
	23,20	3,00	44,00	2,82	4,87	0,41	1,21	29,61
	13,10	3,00	46,00	1,60	2,75	0,13	0,38	30,47
Cerrada	0,00	3,00	48,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,62

Tabla 16: Datos tomados con las Bombas 1, 3 y 5 trabajando en paralelo

Bomba 1 + Bomba 3 + Bomba 5 en paralelo		Bomba 5 trabajando en paralelo con las Bombas 1 y 3						
Posición Válvula	Q (l/s) Medidor Krohne (anillo GRP arriba)	Ps5 (psi)	Pd5 (psi)	Vs (m/s)	Vd (m/s)	Vs <sup>2</sup> /sg (m)	Vd <sup>2</sup> /sg (m)	HB5 (m) Medidor Krohne
Abierta	53,00	2,60	26,00	6,45	11,11	2,12	6,30	20,62
	43,20	3,00	36,00	5,26	9,06	1,41	4,18	25,96
	33,30	3,00	40,00	4,05	6,98	0,84	2,49	27,65
Cerrada	23,20	3,00	43,00	2,82	4,87	0,41	1,21	28,91
	13,10	3,20	46,00	1,60	2,75	0,13	0,38	30,33
	0,00	3,60	48,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,20

