



Universidad de Belgrano
Facultad de Ingeniería

**“Optimización energética en equipos de bombeo
en planta cliente de Sulzer”**

Trabajo Final de Carrera de: Christian Garcia-Agreda Kettels

Tutor: Ing. Jorge Errázquin

Colaboradores: Sulzer Turbo Services Argentina S.A
Ing. Marcos Tomas Malm Morgan

Carrera: Ingeniería Electromecánica

Matrícula: 802-07379

Presentación: Ciudad de Buenos Aires, 4 de Diciembre de 2021

Índice

Introducción	1
Capítulo I: Marco teórico	5
1.1. Bombas centrífugas.....	5
1.1.1 Elementos Constitutivos	6
1.1.2 Funcionamiento	8
1.1.3 Comportamiento de las bombas centrífugas.....	9
1.2 Número específico de revoluciones	11
1.3 Curvas características de las bombas	12
1.3.1 Curva de la instalación y punto de funcionamiento.....	13
1.3.2 Punto óptimo de funcionamiento BEP	15
1.3.3 Curva Potencia-Caudal.....	16
1.3.4 Curva de rendimiento.....	17
1.3.5 Curva NPSHr (Net Positive Suction Head)	18
1.3.6 Cavitación	18
1.4 Regulación con variador de frecuencia	20
1.5 Regulación por estrangulamiento con válvula en serie:	21
1.6 Leyes de afinidad	22
1.7 Caudalímetro ultrasónico modelo TDS-100H.....	23
Capítulo II: Situación actual en las empresas	24
2.1 Ejemplo práctico del funcionamiento de la bomba con válvula estranguladora vs bomba optimizada	24
Capítulo III: Planeación operativa	27
Capítulo IV: Actividades y mediciones de campo	28
Capítulo V: Datos de la empresa, bombas, herramientas e insumos utilizados	30
5.1 Curva bomba SR-P-1313 A/B	31
5.2 Curva bomba SR-P-1312 B.....	32
5.3 Curva bomba GA-P-313 A	33
5.4 Curva bomba SW-P-1415 A/B	34
5.5 Curva bomba SW-P-1414 A/B	35

5.6 Herramientas e insumos	36
Capítulo VI: Desarrollo o relevamiento de bombas	40
6.1 Estudio del comportamiento dinámico de bombas en planta	40
6.2 Mediciones de campo	42
6.3 Tabla resumen de mediciones y punto de funcionamiento de cada bomba. 45	
6.3.1 Resultado de medición Bomba SR-P-1313 A / B.....	46
6.3.2 Resultado de medición Bomba SR-P-1312 B	48
6.3.4 Resultado de medición Bomba SW-P-1415 A / B.....	51
6.3.5 Resultado de medición Bomba SW-P-1414 A / B.....	54
Capítulo VII: Propuestas / Correcciones	56
7.1 Mejora bomba SR-P-1312 B	56
7.2 Mejora bombas SW-P-1415 A/B	59
Mejora bombas SW-P-1414 A/B	60
Capítulo VIII: Análisis económico	63
8.1 Costos Bomba SR-P-1312 B.....	63
8.2 Costos Bomba SW-P-1415 A.....	67
Conclusiones	72
Anexo 1: Hoja de datos y curvas de las bombas Grundfos	74
Bomba Grundfos CR 125-5.....	74
Bomba Grundfos CR 15-6.....	79
Anexo 2: Registro fotográfico	84
Bibliografía	87

Introducción

Los sistemas de bombeo, consisten en la implementación de una o varias bombas a una red de tuberías para incrementar la presión de un fluido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud.

Estas bombas que transportan fluidos en los procesos son de los mayores consumidores de energía y de los que presentan más pérdidas, por lo que se convierte en una necesidad aumentar su eficiencia.

La optimización energética en equipos de bombeo en las plantas es muy necesaria ya que ésta reduce el consumo de energía eléctrica y hace ahorrar recursos económicos importantes a la empresa, además el ahorro energético conlleva a una menor tasa de emisiones contaminantes.

Para tener una idea de los costos del ciclo de vida de una bomba, el precio de compra representa sólo el 5%, el servicio y el mantenimiento sólo un 10% mientras que el 85% del total representa los costos de energía utilizados para el funcionamiento de la bomba.



Imagen: Dato extraído de Grundfos Academy.

Cuando hablamos de la eficiencia energética de las bombas centrífugas nos referimos a qué tan bien se puede convertir la energía mecánica en energía hidráulica (flujo, velocidad y presión).

Tanto las bombas medianas como las más grandes ofrecen eficiencias de 75% a 93%, mientras que las más pequeñas, generalmente caen dentro del rango de 50% a 70%.

Beneficios de mejorar la eficiencia

Beneficios económicos:

- Ahorro económico
- Reducción de costos de operación, mantenimiento o reparaciones.

Beneficios operativos:

- Mayor performance y vida útil de la bomba
- Mayor seguridad de operación

Beneficios ambientales:

- Contribuye a los objetivos ambientales de la empresa
- Mejora la imagen de la empresa, demostrando compromiso con el medioambiente.

Objetivos

- Hacer análisis donde se va determinar en qué punto está trabajando la bomba de acuerdo a su instalación en planta
- Estudiar las distintas formas de modificar la bomba para acercarse al punto de funcionamiento óptimo y realizar una comparación
- Hacer propuestas de medida de ahorro energético y económico
- Implementar el método propuesto en una o más bombas y hacer el correspondiente análisis

Alcance

En este proyecto se hará una investigación para evaluar el funcionamiento de equipos de bombeos y posteriormente proponer métodos para mejorarlos, se implementará puntualmente esta investigación en una empresa específica designada por la empresa Sulzer en la cual se desarrollará el proyecto, la cual se va poder extrapolar a la empresa que lo requiera.

El desarrollo de este trabajo busca poder implementar soluciones a las bombas centrifugas en plantas industriales en cuanto a su funcionamiento.

Se presentará el análisis de la información obtenidas en la práctica, la elaboración de las propuestas de medidas de ahorro con los métodos propuestos y la evaluación de estas medidas, calculando los ahorros que se alcanzaran, el monto total de las inversiones necesarias para su implementación, así como los costos adicionales que pudieran existir.

Limites

- No se realizará la mejora en todas las bombas de la planta, debido a que son demasiadas.
- El proyecto está limitado en cuanto a implementación de la investigación dependiendo así únicamente de la empresa a la que se realice el relevamiento.
- El proyecto se enfocará únicamente en las bombas centrifugas de la planta y no así en los demás elementos.
- La empresa cliente de Sulzer no me permitió usar su nombre, como también alguna de su información por protección de datos.

Organización del documento

Se presentará, en primer lugar, el marco teórico necesario para la comprensión de las bombas en general, sus propiedades, elementos característicos del trabajo a realizar.

Seguidamente, se comentará el proceso de investigación y pruebas para saber cómo están funcionando las bombas, para así poder hacer el correcto análisis correctivo.

Además, en la presente investigación, se buscó desde un comienzo planificar y ejecutar un plan de trabajo, cuyo fin sería generar un orden de cada una de las etapas de desarrollo de la tesina, estimando un período de tiempo a las actividades para, así, lograr un desarrollo ordenado, destinando a éstas un período de investigación establecido.

Se estableció el siguiente cronograma:

Cronograma de trabajo

Cronograma de trabajo		
Actividad	Inicio de actividad	Fin de actividad
Recopilación de información	20/06/2019	22/08/2019
Reunión con los técnicos	23/08/2019	23/08/2019
Visita a la planta industrial	25/08/2019	25/08/2019
Relevamiento de bombas	7/09/2019	10/09/2019
Procesamiento de datos	15/09/2019	15/09/2019
Análisis de resultados	16/4/2021	23/4/2021
Arqueo bibliográfico	24/5/2021	25/8/2021
Complementos marco teórico	24/5/2021	25/8/2021
Redacción del borrador	24/5/2021	25/8/2021
Revisión y corrección	23/09/2021	16/11/2021
Desarrollo final	17/11/2021	01/12/21
Entrega documento final	04/12/2021	04/12/2021

Capítulo I: Marco teórico

1.1. Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas son un tipo de bombas hidráulicas que sirven para transformar la energía mecánica de un impulsor o rodete en energía cinética o de presión de un fluido incompresible. Por lo tanto, la bomba centrífuga convierte la energía con la que es accionada, en este caso mecánica, en energía hidráulica.

Las bombas centrífugas constan de uno o varios impulsores dentro del cuerpo de la bomba, que gira a gran velocidad provocando que el líquido que se encuentra entre sus álabes sea arrastrado por éstos en su movimiento de rotación, absorbiendo su fuerza centrífuga la cual le anima de movimiento proporcionando flujos continuos. Las bombas centrífugas son fabricadas en muy variados modelos, pudiendo ser seleccionadas tomando diversos criterios. Se pueden clasificar de acuerdo a algunos de los conceptos siguientes:

Movimiento del fluido:

- Aspiración o succión simple
- Doble aspiración

Expulsión del fluido:

- Radial (tipos voluta y turbina)
- Diagonal (tipo Francis)
- Helicoidal

Número de etapas

- Una etapa (un impulsor)
- Multietapas (varios impulsores)

Tipo de rotor:

- Impulsor cerrado
- Impulsor semicerrado

- Impulsor abierto Impulsor a prueba de obstrucciones

Posición del eje:

- Vertical
- Horizontal
- Inclinado

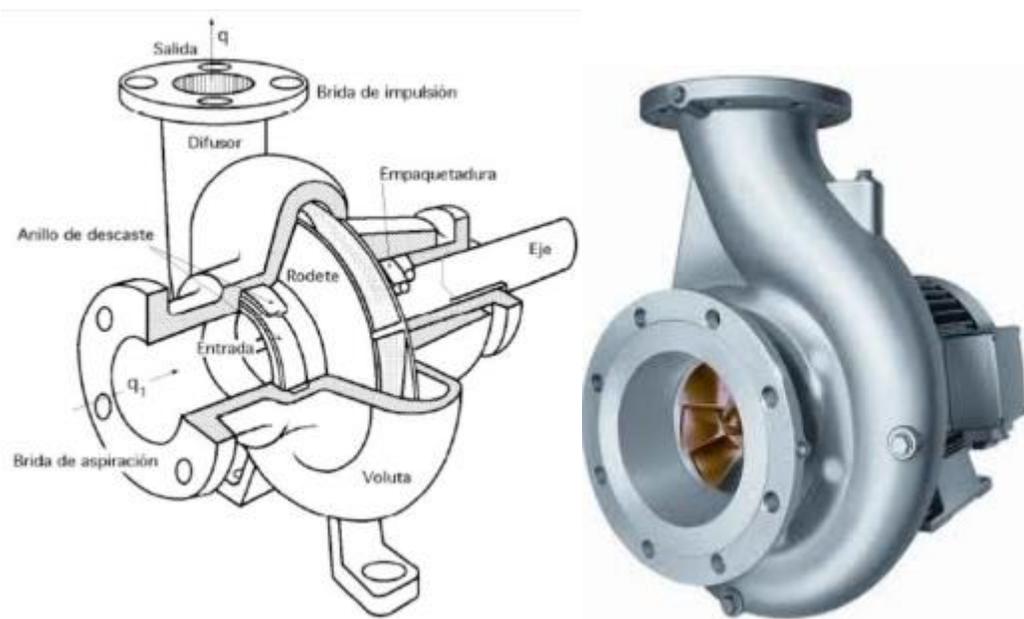
Caudal:

- Variable

Presión:

- Baja presión
- Presión media
- Alta presión

1.1.1 Elementos Constitutivos

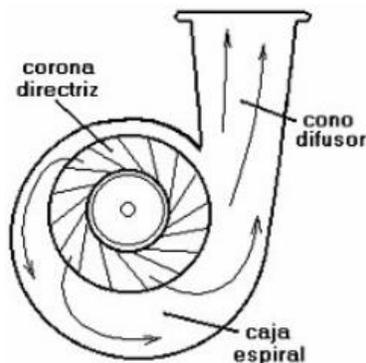


Los principales elementos que constituyen una bomba son los siguientes:

- a) tubo o brida de aspiración: Tiene función de dirigir el fluido hacia el rotor en forma eficiente, con bajas pérdidas, consta de una brida de entrada y cañería de conducción. En general en las bombas la entrada del fluido es completamente axial, por lo que la aspiración no cuenta con álabes de guía para que el fluido tenga velocidad de entrada con componente tangencial.
- b) El impulsor o rodete: formado por una serie de álabes de diversas formas que giran dentro de una carcasa circular. El rodete va unido solidariamente al eje y es la parte móvil de la bomba.



- c) Difusor: El sistema Difusor más completo consta de corona directriz, caja espiral y cono difusor. No todas las bombas tienen los tres elementos. En el cono difusor al incrementarse la sección de la carcasa, la velocidad del agua disminuye lo que contribuye a transformar la energía cinética en energía de presión, mejorando el rendimiento de la bomba.



d) Eje: El eje de la bomba es una pieza en forma de barra de sección circular no uniforme que se fija rígidamente sobre el impulsor y le transmite la fuerza del elemento motor.

e) Caja espiral o voluta: Es la parte exterior protectora de la bomba y cumple la función de convertir la energía cinética impartida al líquido por el impulsor en energía de presión. Esto se lleva a cabo mediante reducción de la velocidad por un aumento gradual del área.

f) Anillos de desgaste: Cumplen la función de ser un elemento fácil y barato de remover en aquellas partes en donde debido a las cerradas holguras entre el impulsor y la carcasa, el desgaste es casi seguro, evitando así la necesidad de cambiar estos elementos y quitar solo los anillos.

g) Base: Sirven de soporte de la bomba, sosteniendo el peso de toda ella.

1.1.2 Funcionamiento

El líquido ingresa axialmente por la tubería de aspiración hasta la entrada del rodete, experimentando un cambio de dirección, acelerándose y absorbiendo un trabajo.

Los álabes del rodete someten al fluido a un movimiento de rotación, el fluido es proyectado hacia el exterior y abandona el rodete hacia el difusor y/o la voluta a gran velocidad.

Este es un transformador de energía, ya que frena la velocidad del líquido, transformando parte de la energía cinética creada en el rodete en energía de presión, presión que se suma a la alcanzada por el líquido en el rodete.

También guían al líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiando la dirección de su movimiento y llevándolo hacia la brida de impulsión de la bomba.



1.1.3 Comportamiento de las bombas centrifugas

Las características de mayor importancia para definir el comportamiento hidráulico de una bomba son:

- Caudal Q
- Carga H
- Potencia P
- Eficiencia η

La velocidad n y el diámetro D del impulsor, son variables que influyen notablemente sobre las anteriores.

Caudal Q

El caudal Q de la bomba es el volumen de fluido que entrega por unidad de tiempo. En el sistema métrico las unidades son $[m^3/s]$ y su equivalente en $[l/s]$. Estrictamente se define al caudal como el volumen de líquido que circula a una velocidad a través de una sección de área A y se representa con esta ecuación:

$$Q = V * A$$

Altura de carga o altura total

La altura total se puede definir como la altura, presión diferencial o la resistencia que deberá vencer la bomba, para elevar un caudal de líquido determinado a través de una tubería desde un nivel inferior a otro superior. Esta altura también puede ser representada mediante la siguiente igualdad.

$$H = H_s + H_d$$

Donde

H_s = Altura estática

H_d = Altura dinámica

La componente estática es independiente del caudal, es la altura geodésica, desde el nivel del líquido de succión hasta el nivel del líquido de impulsión, más la presión interna de cada recipiente, si la hubiera; si son atmosféricos, solo se considera la diferencia de altura .

La componente dinámica es dependiente del caudal, es la suma de la pérdida de carga, que depende del cuadrado del caudal, más la altura dinámica dada por la diferencia de velocidades del fluido, si la hubiera.

Potencia hidráulica, potencia en el eje y potencia eléctrica

Por un lado, está la potencia hidráulica de la bomba, que es la energía transferida al fluido que es bombeado por unidad de tiempo. Y se calcula:

$$PH [kW] = \frac{p * Q * H}{367}$$

Donde:

p = peso específico [kg/dm³]

Q = caudal [m³/h]

H = altura manométrica [m]

367 es una constante

Por otro lado, está la potencia en el eje, es la potencia que entrega un motor para impulsar la bomba.

$$Peje [kW] = \frac{PH}{\eta}$$

Donde

η= eficiencia de la bomba

También tenemos que la potencia eléctrica consumida de la red eléctrica se calcula:

$$Peléctrica [kW] = \frac{Peje}{\eta_{motor}}$$

Donde

η= eficiencia del motor

Eficiencia o rendimiento η

La eficiencia de la bomba equivale al cociente de dividir la potencia hidráulica y la potencia en el eje de la bomba, se expresa en porcentaje.

$$eficiencia \ de \ la \ bomba = \eta = \frac{PH}{Peje} = \eta_v * \eta_h * \eta_m$$

Donde

η_v = pérdidas por fugas de fluido dentro del cuerpo de la bomba.

η_h = pérdidas debido al rozamiento del fluido con las paredes de la bomba

η_m = pérdidas mecánicas debido al rozamiento en los cojinetes de los ejes, etc.

1.2 Número específico de revoluciones

El número específico de revoluciones N_s es muy importante en el análisis de las bombas.

Una forma muy utilizada de clasificar, caracterizar y comparar las bombas, es a través de la utilización de un número índice denominado número específico de revoluciones (N_s).

Es un parámetro de gran utilidad en la caracterización de las bombas, independientemente de su tamaño y velocidad de funcionamiento.

El N_s permite comparar bombas, las que son geoméricamente semejantes tienen el mismo N_s .

Se calcula:

$$n_s = 3.65 \cdot \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Donde:

Q=Caudal [m³/s]

H=Altura manométrica [m]

N=Numero de revoluciones por minuto [rpm]

Conceptualmente, la velocidad específica es el número de revoluciones por minuto de una bomba ideal, geoméricamente semejante a la bomba en consideración, necesaria para elevar 75 l/s a una altura de 1m.

También se puede usar este número para una selección preliminar de bombas, conociendo el caudal y el salto requerido, estableciendo un numero de revoluciones

dado por el motor, se puede calcular el N_s y preseleccionar el tipo de bomba adecuado a la aplicación.

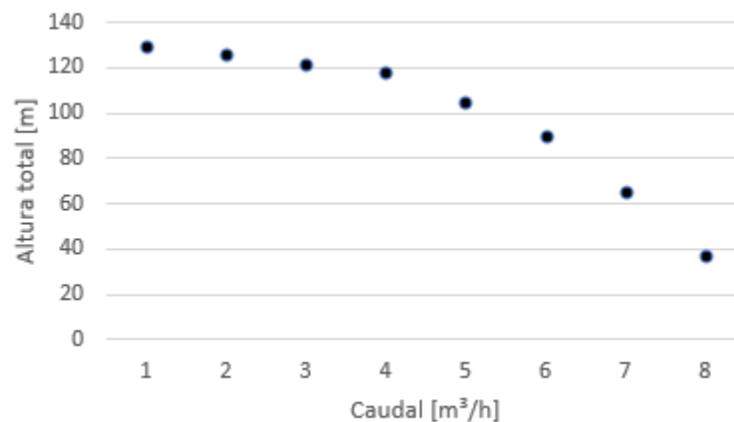
1.3 Curvas características de las bombas

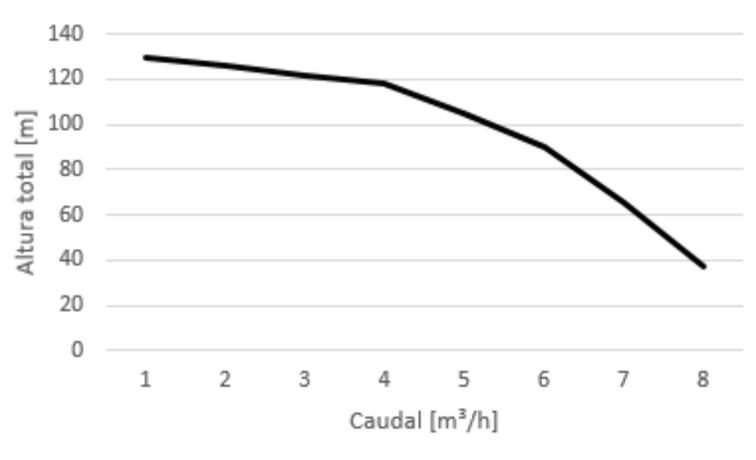
El comportamiento hidráulico de una bomba viene especificado en sus curvas características, estas mismas representan una relación entre los distintos valores del caudal proporcionado por la misma bomba con otros parámetros como la altura manométrica, el rendimiento hidráulico y la potencia requerida que están en función del tamaño, diseño y construcción de la bomba.

En el manual de la bomba se encuentran las curvas de cada bomba y, por supuesto, el punto de trabajo en el cual debemos mantener a nuestra bomba para que funcione como está previsto. El fabricante es el que se encarga de trazar las curvas características de sus bombas.

Para la obtención de las curvas de una bomba se construyen bancos de prueba y ensayo equipados con todo lo necesario para ello. Se va midiendo la presión mientras se varía el caudal por medio de válvulas.

Se realiza este proceso varias veces y se obtiene una serie de puntos para graficar la curva.





1.3.1 Curva de la instalación y punto de funcionamiento

Para saber si las bombas están trabajando en una buena condición. Hay que enfocarse también en otra curva llamada curva de la instalación o del sistema.

Esta curva representa la altura total requerida por la instalación en función del caudal. Al ir aumentando el caudal, aumenta la velocidad del líquido, por lo tanto, aumenta también la pérdida de carga con el cuadrado de la velocidad, por este motivo la curva tiene forma parabólica.

Esta curva determina la resistencia del sistema, determina lo que tiene que vencer una bomba para atravesar la pérdida de fricción de una cierta cantidad de metros de tuberías

Para la construcción de la curva de instalación se tiene que determinar la sumatoria de las pérdidas de fricción en las tuberías y las pérdidas de fricción en los accesorios.

$$H_f = H_L + H_a$$

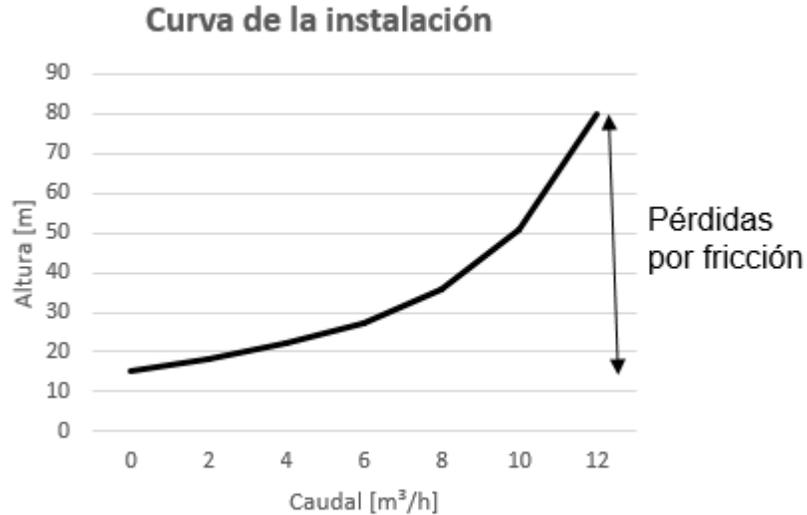
Donde

H_f = pérdida total de fricción

H_L =pérdidas de fricción en las tuberías

H_a =pérdidas de fricción en los accesorios

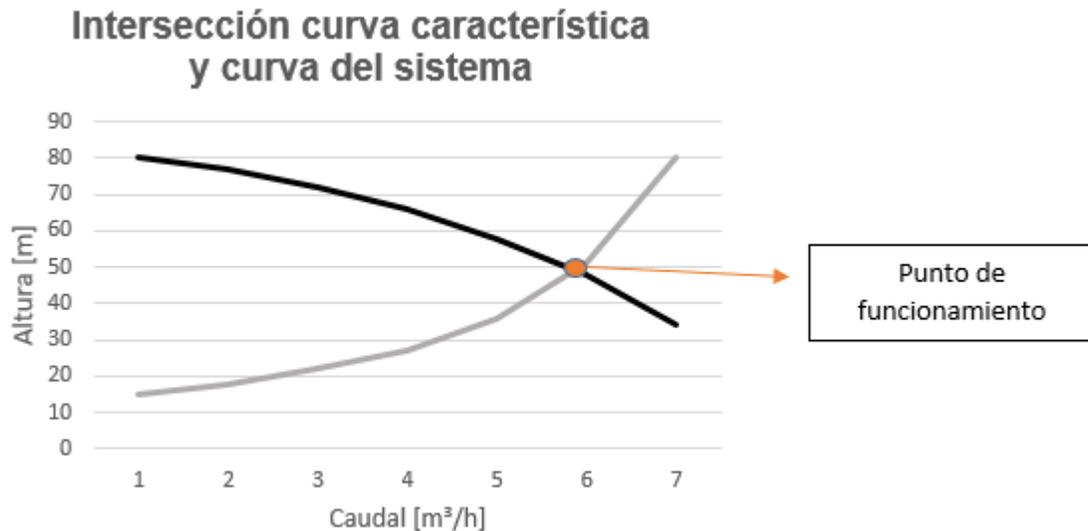
Se representa de esta forma y varía según su instalación:



Una bomba centrífuga que ha sido diseñada para un caudal Q , una altura de elevación H y un número N de revoluciones por minuto, funcionando bajo los valores de su curva característica es indudable que dará su mejor eficiencia, pues así fue prevista. Sin embargo, es muy común encontrar que los sistemas de bombeo operan en condiciones diferentes para las que están diseñados.

Para saber si las bombas están trabajando en una buena condición, debemos hallar primeramente el punto de funcionamiento.

Para obtener el punto de trabajo de nuestra bomba debemos tener en cuenta que debe ser aquel en el que la altura total generada por la misma sea igual a la altura necesaria en la instalación, es decir, el punto de trabajo de la bomba se encuentra en la intersección de las dos curvas ya mencionadas.



El punto donde se cruzan las dos curvas se le denomina punto de funcionamiento de la bomba, esta intersección determina el caudal Q que puede ser suministrado por la bomba a través de nuestro sistema y con éste podremos determinar la potencia absorbida P , el rendimiento η y el NPSHR de la bomba.

Cabe aclarar que en el manual de la bomba la curva característica debería estar bien medida y con precisión, al igual que la curva de la instalación.

1.3.2 Punto óptimo de funcionamiento BEP

De acuerdo con su diseño, todas las bombas tienen un punto de operación altura-caudal óptimo, donde todas las pérdidas se minimizan.

Según sus siglas en inglés se denomina BEP (Best efficient point).

El BEP representa gráficamente el punto en la curva de una bomba que produce la operación más eficiente.

La idea siempre es lograr que la bomba trabaje cerca de ese punto o zona para evitar inconvenientes y ahorrar energía.

Fuera de este punto se presentan problemas como los siguientes:

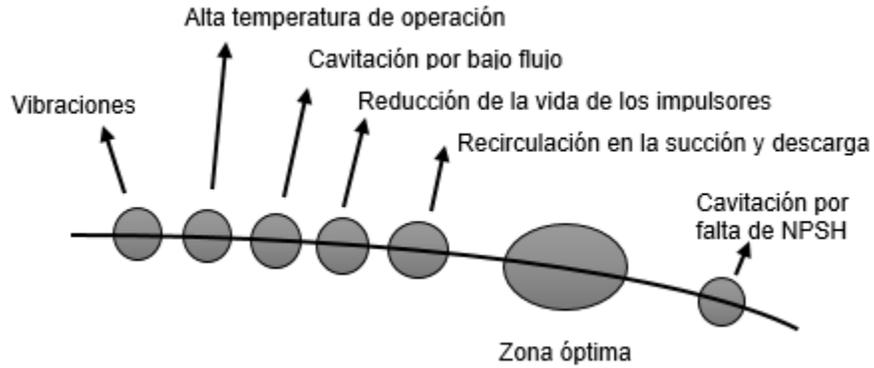
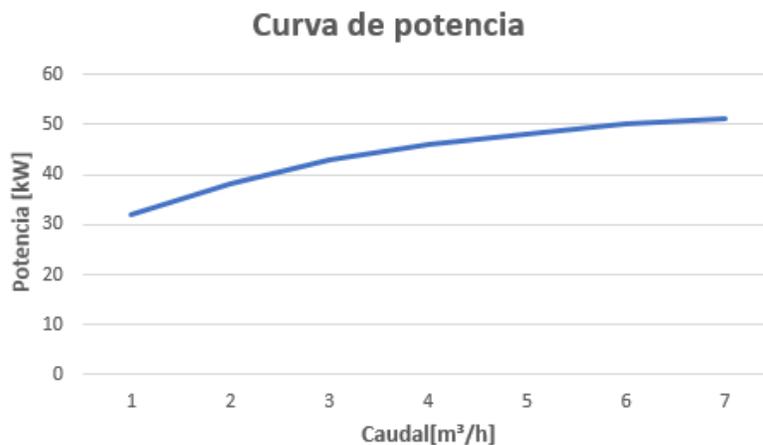


Diagrama esquemático de los problemas que se presentan por operación de las bombas fuera de su punto óptimo

1.3.3 Curva Potencia-Caudal

El consumo del motor que acciona la bomba centrífuga se puede monitorear con los instrumentos de medida adecuados. Así, tendremos la potencia consumida por la bomba P.

De esta forma, se puede obtener la curva de potencia consumida P por la bomba en función del caudal suministrado Q. Trasladando todos estos puntos sobre los ejes de coordenadas obtenemos una nueva gráfica, en el eje de abscisas tenemos los valores del caudal Q y en el eje de ordenadas los valores de la potencia consumida P.



1.3.4 Curva de rendimiento

Esta curva muestra la variación del rendimiento η de la bomba en función del caudal Q .

El rendimiento es el cociente entre la potencia hidráulica y la potencia consumida

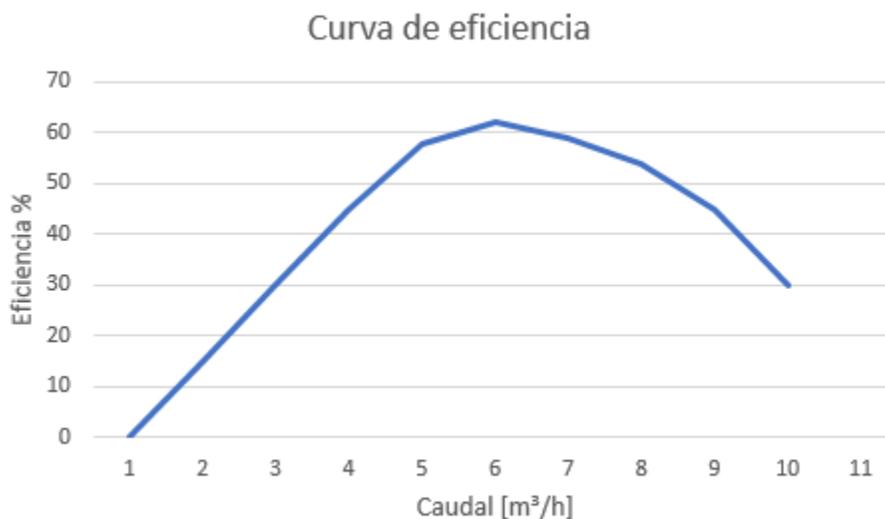
$$\eta = \frac{P_h}{P}$$

Donde P_h es el trabajo útil realizado por la bomba centrífuga por unidad de tiempo, es decir viene dada por la expresión:

$$P_h = \gamma \cdot Q \cdot H$$

En donde γ es el peso específico del líquido bombeado, depende de la temperatura a la cual se realiza el bombeo.

Tiene la forma mostrada en la siguiente figura.



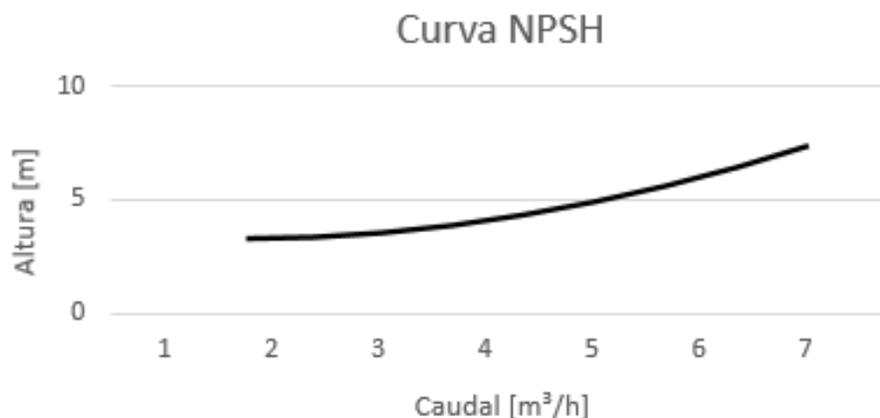
1.3.5 Curva NPSHr (Net Positive Suction Head)

También llamada curva de altura neta positiva, esta curva representa la presión mínima que debe haber en la entrada de la bomba para evitar fenómenos de cavitación, medida en la brida de aspiración de la bomba.

Es una característica propia de la bomba que puede ser obtenida solamente en forma experimental en los bancos de prueba de los fabricantes.

Su fin práctico es el de mantener en la entrada del rodete la presión de aspiración por encima de la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo. Explicado más adelante en la parte de cavitación.

La forma de esta curva es la representada en la siguiente figura.



1.3.6 Cavitación

La cavitación es uno de los fenómenos que existen en los procesos de bombeo.

Hay veces en la que, el personal no está calificado o que no está familiarizado con este fenómeno y hace que confunda algunos síntomas detectados sobre una bomba centrífuga con el fenómeno de la cavitación.

Es un fenómeno que se da cuando en algún punto de la bomba, la presión absoluta del fluido llega a un valor tan bajo, que es menor a la presión de saturación del vapor a la temperatura en la que se encuentra el fluido, produciéndose burbujas de vapor que afectan el normal funcionamiento de la bomba, estas burbujas son arrastradas junto con el líquido hasta otra región donde se alcanza una presión más elevada, instantáneamente toda la fase de vapor pasa a líquido en forma violenta, esto se acompaña de ruidos y vibraciones que afectan las partes metálicas.

La zona en la que se produce el fenómeno es la de menor presión, generalmente la succión de la bomba, entrada del impulsor o algún paso interno de la bomba.

La cavitación reduce el rendimiento y performance de la bomba, además de producir erosión y vibraciones.

La condición para que no se produzca cavitación es que la presión absoluta en cualquier punto de la succión de la bomba, se mantenga por sobre la presión de vapor del líquido, a la temperatura en que se encuentre el mismo.

La presión de vapor de un líquido a una determinada temperatura se define como aquella presión en la que coexisten tanto la fase líquida como la de vapor.

NPSH (Net Positive Suction Head)

Este término significa altura neta positiva de aspiración, se trata de la diferencia entre la presión del líquido en el eje del impulsor y la presión de vapor del líquido, en otras palabras, es la presión absoluta mínima que necesita una bomba para no cavitación.

Al final este concepto nos sirve, de manera práctica, para poner limitaciones a las condiciones de aspiración de la bomba de manera que la presión del fluido, a la entrada del impulsor, esté por encima de la presión de vapor del líquido bombeado.

Partiendo de este concepto podemos definir el NPSH requerido o NPSHr y el NPSH disponible o NPSHd.

Altura Neta Positiva de Aspiración Requerida (NPSHr en inglés)

El ANPAr es un dato que brinda el fabricante de la bomba. Depende del diseño de la bomba. Cambia según el caudal y las revoluciones del motor.

Este valor informa sobre la capacidad de aspiración que tiene la bomba en un punto determinado de su curva característica.

El ANPAr requerido por la bomba debe ser menor al ANPAd disponible de la instalación en todas las condiciones de funcionamiento de la instalación, para trabajar sin cavitación.

$$\text{ANPAr} \leq \text{ANPAd}$$

El Hydraulic Institute indica que se tiene que añadir 1 m.c.a por seguridad.

$$\text{ANPAr} + 1 \text{ m.c.a} \leq \text{ANPAd}$$

Altura Neta Positiva de Aspiración Disponible (NPSHd en inglés)

El valor de NPSHd depende de las características de la instalación y equivale a la reserva total de presión por encima de la presión de vapor del fluido y que se encuentra disponible en la zona de la brida de aspiración de la bomba.

Este valor resume en un sólo concepto todas las características de la instalación que influyen en la altura de aspiración de una bomba.

Debemos de calcularlo de esta forma:

En términos de presiones:

$$NPSHd [mca] = \frac{P_{atm} \pm P_{man} \pm P_{\Delta nivel} - P_{pf} - P_v}{\text{gravedad} * \text{densidad}}$$

En términos de alturas:

$$NPSHd [mca] = H_{patm} \pm H_{pman} \pm H_{\Delta nivel} - H_{pf} - H_{pv}$$

Si el recipiente de alimentación está abierto a la atmosfera, entonces $H_{patm}=0$

Entonces:

$$NPSHd [mca] = H_{patm} \pm H_{\Delta nivel} - H_{pf} - H_{pv}$$

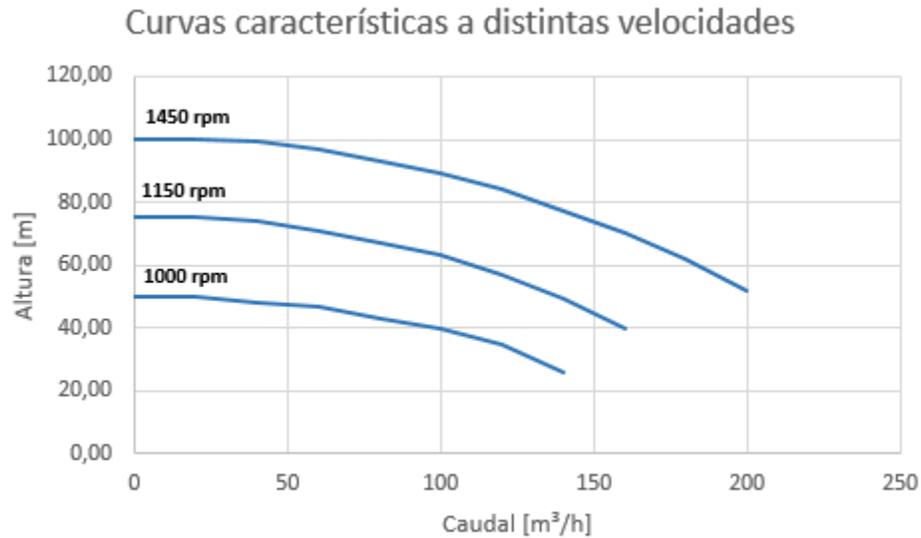
1.4 Regulación con variador de frecuencia

En algunos casos puede ser conveniente hacer funcionar la bomba a menor velocidad para disminuir el caudal y la altura manométrica tras una reducción de carga de la instalación.

La velocidad de la bomba se puede reducir por vía electrónica mediante un variador de frecuencia, utilizando una señal que envía un sensor de Δp instalado en el circuito.

En este caso, la bomba puede suministrar una altura manométrica más baja que cuando funciona a velocidad constante. De esta forma se consigue disminuir la potencia, sin bajar el rendimiento. Es decir, al cambiar el régimen de giro de la bomba, se modifica la curva característica, y naturalmente el punto de funcionamiento. Se trata de un sistema muy eficiente desde el punto de vista energético, puesto que no se introducen pérdidas adicionales.

A continuación, imagen de la bomba trabajando a distintas velocidades.



1.5 Regulación por estrangulamiento con válvula en serie:

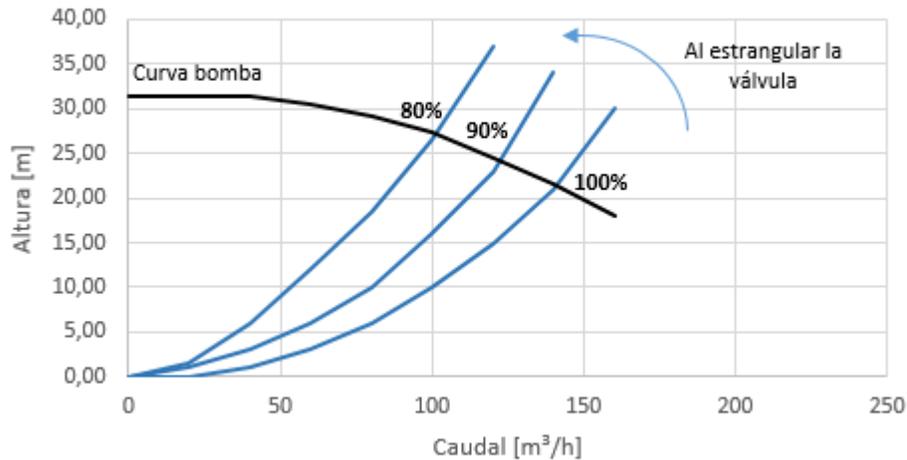
Consiste en modificar la apertura de una válvula situada a la salida de la bomba. Al cerrar la válvula, cambia la curva resistente de la instalación, siendo posible reducir el caudal de impulsión hasta el valor deseado.

El rendimiento de la bomba subirá o bajará según la posición de partida respecto del máximo. Se trata del método más empleado; no es energéticamente eficiente, ya que se pierde mucha energía al cerrar y abrir dicha válvula.

Si la estrangulación se realiza en la tubería de aspiración, se podría provocar cavitación en la bomba, por lo que dicha estrangulación se realiza siempre en la zona de presión (impulsión de la bomba).

Al abrir y cerrar las válvulas la curva de la instalación se mueve así:

Curvas de la instalación al estrangular la tubería



1.6 Leyes de afinidad

Las leyes de afinidad corresponden a los procesos teóricos, y son de gran importancia en el diseño de las estaciones de bombeo. Predicen los cambios en el rendimiento de una bomba existente al modificar el régimen de giro o para estimar el rendimiento después de una modificación del diseño como puede ser el recorte del impulsor.

Las leyes muestran que incluso una pequeña reducción en el caudal se convertirá en reducciones importantes de potencia y, por tanto, de consumos energéticos. Estas leyes son la base del ahorro energético.

Cuando se modifica una de las variables involucradas en el rendimiento de la bomba, las otras variables se pueden calcular utilizando la ley de afinidad.

$$\frac{Q1}{Q2} = \frac{N1}{N2} = \frac{D1}{D2}$$

$$\frac{H1}{H2} = \left(\frac{N1}{N2}\right)^2 = \left(\frac{D1}{D2}\right)^2$$

$$\frac{P1}{P2} = \left(\frac{N1}{N2}\right)^3 = \left(\frac{D1}{D2}\right)^3$$

Donde

Q = caudal [m³/h]

N = velocidad de la bomba [rpm]

H = altura [bar]

P = potencia [kW]

Una vez que se ha seleccionado una bomba con un determinado diámetro de rotor, para entregar un caudal a una altura dada, las leyes de afinidad se pueden utilizar para estimar qué nueva velocidad o diámetro del rotor se requiere para satisfacer una nueva condición operativa, que actualmente está más allá del alcance de la bomba.

A través de las leyes de afinidad, pueden desarrollarse nuevas curvas de altura y potencia en función del caudal, para un cambio en la velocidad de giro o un cambio de diámetro de rotor.

1.7 Caudalímetro ultrasónico modelo TDS-100H

Es un instrumento que mide la velocidad del fluido en un conducto cerrado.

Opera transmitiendo y recibiendo impulsos ultrasónicos entre los transductores y midiendo el tiempo que tarda este en viajar entre los dos transductores.

Se envía una señal de frecuencia a través de un líquido que causa que se refleje, la frecuencia de este pulso que retorna cambia, y ese cambio de frecuencia será proporcional a la velocidad del líquido.

El aparato mide de esta forma:

$$V = \left(\frac{M * D}{\sin 2 * \theta} \right) * \left(\frac{\Delta T}{T_{up} * T_{down}} \right)$$

Donde

θ = ángulo entre transductores tomados desde la vertical

M = tiempo de viaje del rayo ultrasónico

D = diámetro de cañería

T_{up} = tiempo del rayo ultrasónico del transductor desde el transductor que está aguas arriba (en contra de la corriente) hasta el que está aguas abajo (a favor de la corriente)

Tdown = tiempo del rayo ultrasónico del transductor desde el transductor aguas abajo hasta aguas arriba.

Delta T = Tup - Tdown

Datos extras del instrumento:

Rango de medición de tuberías: 20-6000 mm

Batería duración: 12 horas

Líquidos permitidos: agua potable, productos químicos, aguas negras, recuperadas, de enfriamiento, de ríos, etc.

Métodos de montaje: " V ", " W " y " Z "

Capítulo II: Situación actual en las empresas

Hoy en día, el problema en los sistemas de bombeos en las plantas industriales es que las bombas generalmente están sobredimensionadas. Este sobredimensionamiento se debe primero, en el proceso de diseño de planta y segundo, en la compra. El ingeniero de diseño busca llegar a valores de caudal y de presión requeridos por el proceso agregando a su diseño un factor de seguridad (algún litro o bar de más).

Por otro lado, la persona que compra no quiere equivocarse comprando una bomba que este muy justa a dicha instalación, al no haber bomba para todos los caudales específicos, ya que están estandarizados, se opta por comprar una más grande, terminando todo con una bomba más grande de lo que necesitas.

Entonces lo que hacen las empresas, es poner válvulas reguladoras/estranguladoras a la salida de la bomba para llegar a la condición de operación del proceso, creando una pérdida de presión adicional. Con este procedimiento disminuye notablemente el rendimiento.

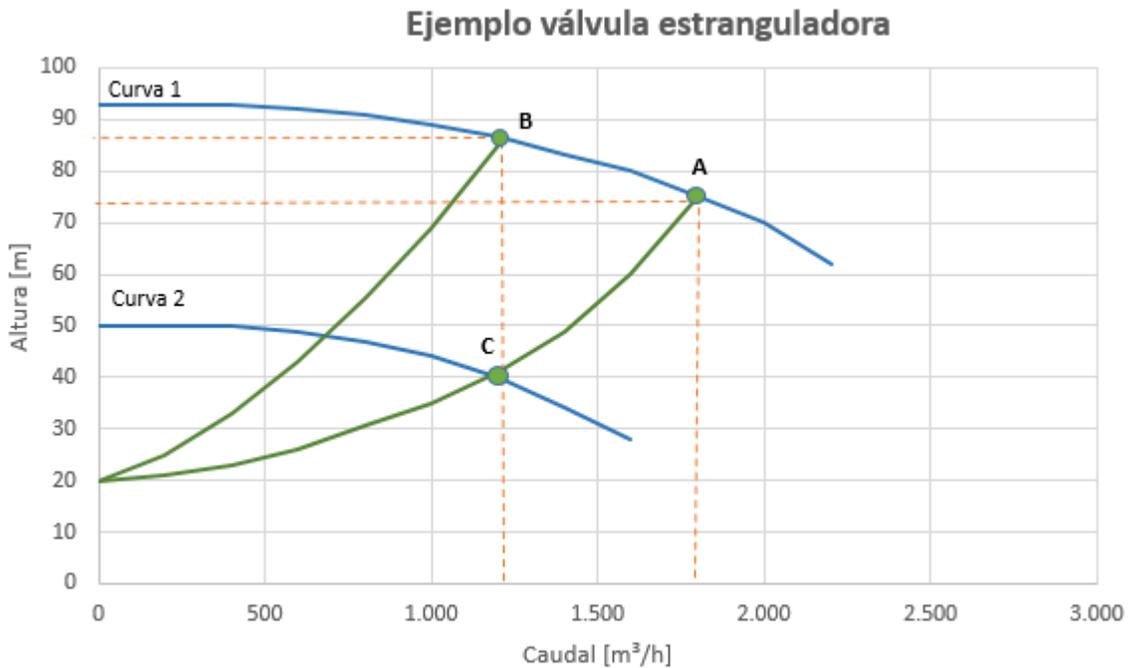
Es un método simple y fácil de adoptar, pero no es la más indicada.

Operar esta válvula es cómo manejar un auto con un pie en el acelerador y otro en el freno, acelerar y frenar gastando un exceso de energía.

2.1 Ejemplo práctico del funcionamiento de la bomba con válvula estranguladora vs bomba optimizada

Pongamos un ejemplo de lo que pasa al usar válvula reguladora en vez de tener una bomba óptima para la instalación.

Tenemos una bomba grande seleccionada para trabajar con un caudal de 1800[m³/h] y 75 [m]. (Punto A)



En planta, nos damos cuenta que necesitamos menos caudal, necesitamos 1130 [m³/h] para trabajar.

Primero aplicamos el método de recortar el impulsor, al recortarlo o cambiarlo por uno de diámetro más chico, la curva característica pasaría a ser la “curva 2” y el punto de funcionamiento sería el C. Cabe aclarar que los anillos de desgaste son independientes del diámetro del rotor, si lo acortamos no es necesario cambiar estos.

Tenemos un caudal de 1130 [m³/h] y una altura de 40 [m].

Procedemos a calcular la potencia hidráulica que consume el sistema:

$$Ph[Kw] = \frac{Q \left[\frac{m^3}{h} \right] * H[m] * \rho}{367} = \frac{1130 \left[\frac{m^3}{h} \right] * 40[m] * \rho}{367} = 123,16Kw$$

Ahora nos fijamos como sería si en vez de recortar el impulsor, usamos la válvula estranguladora para llevarlo al caudal deseado.

Al abrir o cerrar la válvula, cambia la curva de la instalación, teniendo ahora el punto B.

Como podemos observar, tenemos el mismo caudal, pero hay una diferencia grande de altura, ahora tenemos una altura grande innecesaria, que la provocamos al reducir el caudal con la válvula.

Tenemos 1130 [m³/h] de caudal y 87 [m] de altura.

Procedemos a calcular:

$$Ph[Kw] = \frac{Q \left[\frac{m^3}{h} \right] * H[m] * \rho}{367} = \frac{1130 \left[\frac{m^3}{h} \right] * 87[m] * \rho}{367} = 267,87 Kw$$

Calculamos la diferencia:

$$\Delta P = 267,87 Kw - 123,16 Kw = 144,71 Kw$$

Supongamos que el servicio de esta bomba es continuo, las 24 horas, los 365 días del año.

$$Servicio\ continuo = 24 \frac{horas}{dia} * 365\ dias = 8760\ horas$$

Suponemos que el costo de energía por hora es:

$$Costo\ de\ energia = 0.08 \frac{USD}{Kw * hora}$$

El ahorro en un año sería:

$$Consumo\ ahorrado\ anual = 144 Kw * 8760 horas * 0.08 \frac{USD}{Kw * horas} = 101.413 USD$$

Haciendo notar que es un ahorro significativo el recortar los impulsores o usar variadores de frecuencia en vez de trabajar con válvulas reguladoras/estranguladoras ya que se desperdicia mucha energía.

Capítulo III: Planeación operativa

Se planea realizar un estudio hidráulico en los procesos de bombeos en plantas industriales para el uso eficiente de energía.

Hacer un relevamiento en una planta cliente de Sulzer Turbo Services Argentina S.A, con su respectiva capacidad instalada de equipos, toda la energía hidráulica necesaria y poder hacer esta investigación definiendo la energía hidráulica que requiere el proceso versus la energía disponible en la bomba, ajustarla para poder ver el ahorro que hay.

Concluyendo en un análisis de lo que se puede ahorrar energéticamente y económicamente, planteando correcciones necesarias.

¿Cómo se puede optimizar?

Dentro de las acciones que pueden reducir el costo de la energía e incrementar la eficiencia energética de las bombas centrífugas se tiene una gran variedad, las que se profundizarán serán:

- Motor con variador

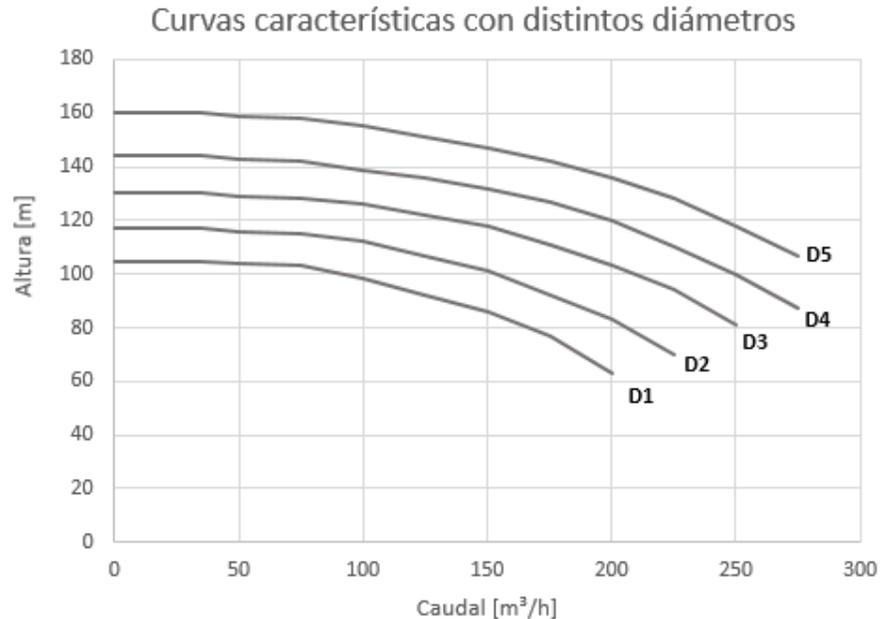
Implementar un sistema de control de presión y caudal por medio de un variador de frecuencia electrónico adaptado al motor eléctrico y variar las revoluciones por minuto y acercarse a una zona más óptima de funcionamiento.

Una vez determinados los ahorros de energía eléctrica, se estima el monto de las inversiones necesarias para la implantación de esta medida de ahorro y se realiza la evaluación económica del proyecto de inversión.

- Modificar/recortar el impulsor de la bomba

Se puede recortar el impulsor de la bomba, que, gracias a las leyes de afinidad, podemos obtener el resultado de los demás parámetros.

La curva que se obtiene con un rodete es única, si usamos un diámetro distinto, la curva obtenida será distinta. Normalmente, en una misma bomba podemos usar distintos diámetros de rodete formando una familia de curvas en función de los diámetros D diferentes de impulsor a utilizar.



- Cambiar la bomba

Al no ser posible algún método de los dos anteriores, se procederá a ver una nueva bomba, la cual estará previamente estudiada para hacer una correcta recomendación. Calculando los precios importantes.

Capítulo IV: Actividades y mediciones de campo

Las actividades de campo próximas a realizar son:

1. Investigación previa. Se estudiará las distintas bombas que estén en planta sujetas al próximo estudio, así como también, su instalación e instrumentos de medición. Además, se debe determinar el método a utilizar para la evaluación de eficiencia para determinar que bombas están trabajando correctamente o no.

2. Mediciones y recolección de datos. Se procederá a medir la presión con los manómetros de carga y descarga de las bombas. Hallaremos la diferencia de presiones, para que, con el caudal, saber en qué punto está trabajando la bomba.

No todas las bombas tienen indicación de caudal, así que usaremos un caudalímetro ultrasónico para medir el caudal en caso de no tenerlo.

En planta tenemos el centro de control de motores, donde se encuentran todos los relés inteligentes y así obtendremos todos los parámetros eléctricos, si no se tuviera la instalación adecuada que mida y registre los valores eléctricos, se puede recolectar los mismos datos en campo mediante una pinza amperométrica.

Usaremos una tabla para recolectar los datos de las mediciones

Bomba		Bomba 1								
N°	Horario	P in [kg/cm2]	P out [kg/cm2]	Delta P [kg/cm2]	Delta P [m]	Caudal [m3/h]	Valv. Reguladora [%]	Valv. Bypass [%]	Potencia activa [kW]	Temperatura del fluido [C°]
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
Final										

3. Estudio de la información obtenida y BEP. Con los valores de presión y caudal obtenidos sabremos el punto exacto en el cual la bomba está trabajando y así lo compararemos con los datos de manual de la curva característica.

4. Evaluación de resultados. Con los datos obtenidos en los pasos anteriores, podremos decir a ciencia cierta, que bombas están funcionando de manera eficiente y que bombas no.

Más adelante, para las bombas que no estén trabajando en condiciones, estudiaremos distintas soluciones, generaremos propuestas de medidas de ahorro al llevar estas bombas a un punto óptimo con buenas eficiencias y ver el posible ahorro económico que tendríamos.

Se calculará la potencia en el eje, para saber el consumo anual y de toda la vida útil de la bomba para poder calcular el ahorro que tendríamos.

Potencia hidráulica: Con los valores de presión y de caudal, además del peso específico del líquido a la temperatura de bombeo.

$$PH = \frac{p \cdot Q \cdot H}{367} [\text{kW}]$$

Potencia en el eje: Con la potencia hidráulica y los rendimientos.

$$Peje = \frac{PH}{\eta}$$

Capítulo V: Datos de la empresa, bombas, herramientas e insumos utilizados

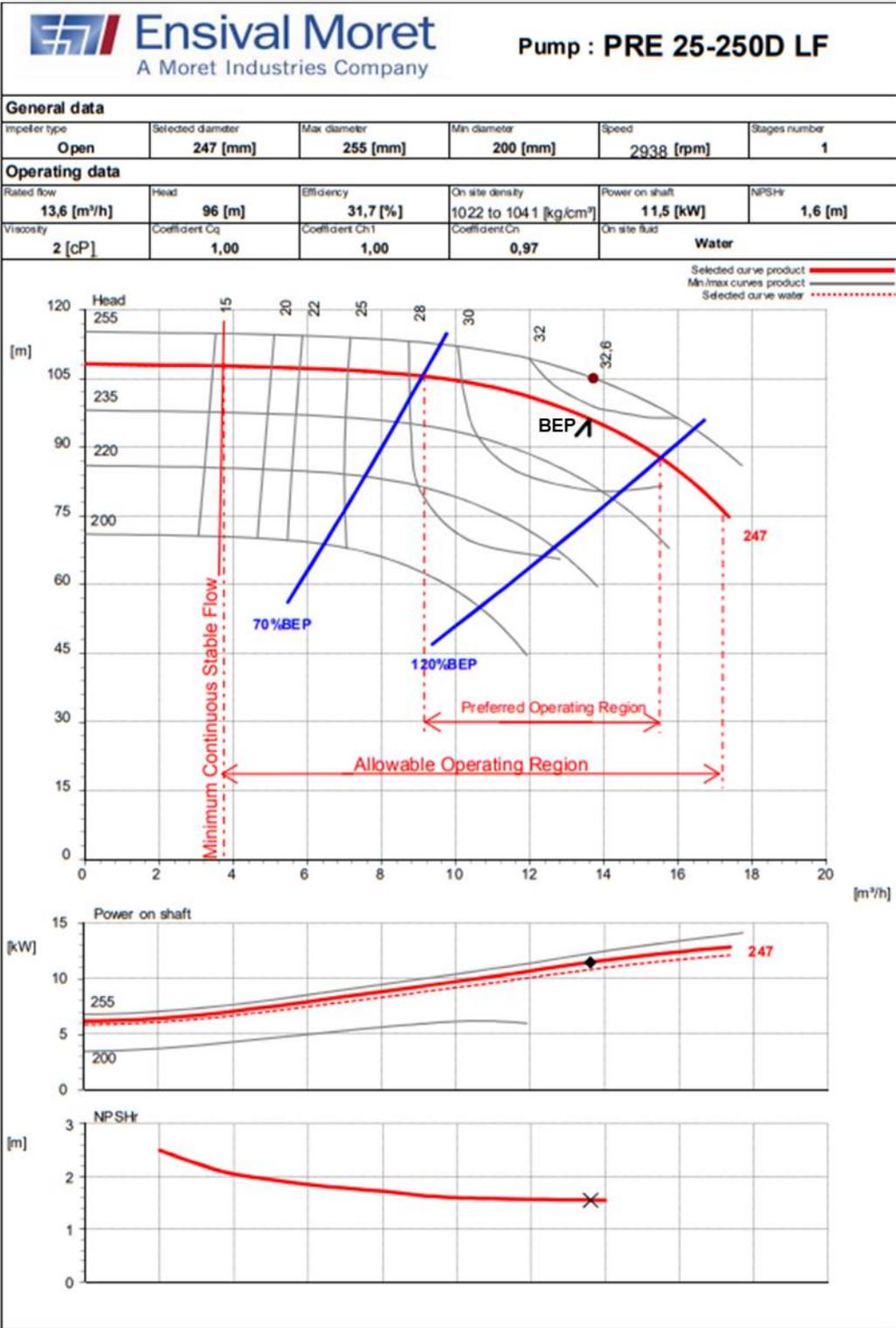
Las pruebas se realizaron en una refinería en la provincia de Buenos Aires en una empresa la cual no tengo autorización de dar a conocer su nombre y datos personales.

Se investigó previamente la empresa y se concluyó en hacer un estudio dinámico de ocho bombas seleccionadas Ensival Moret con los siguientes tags en orden cronológico:

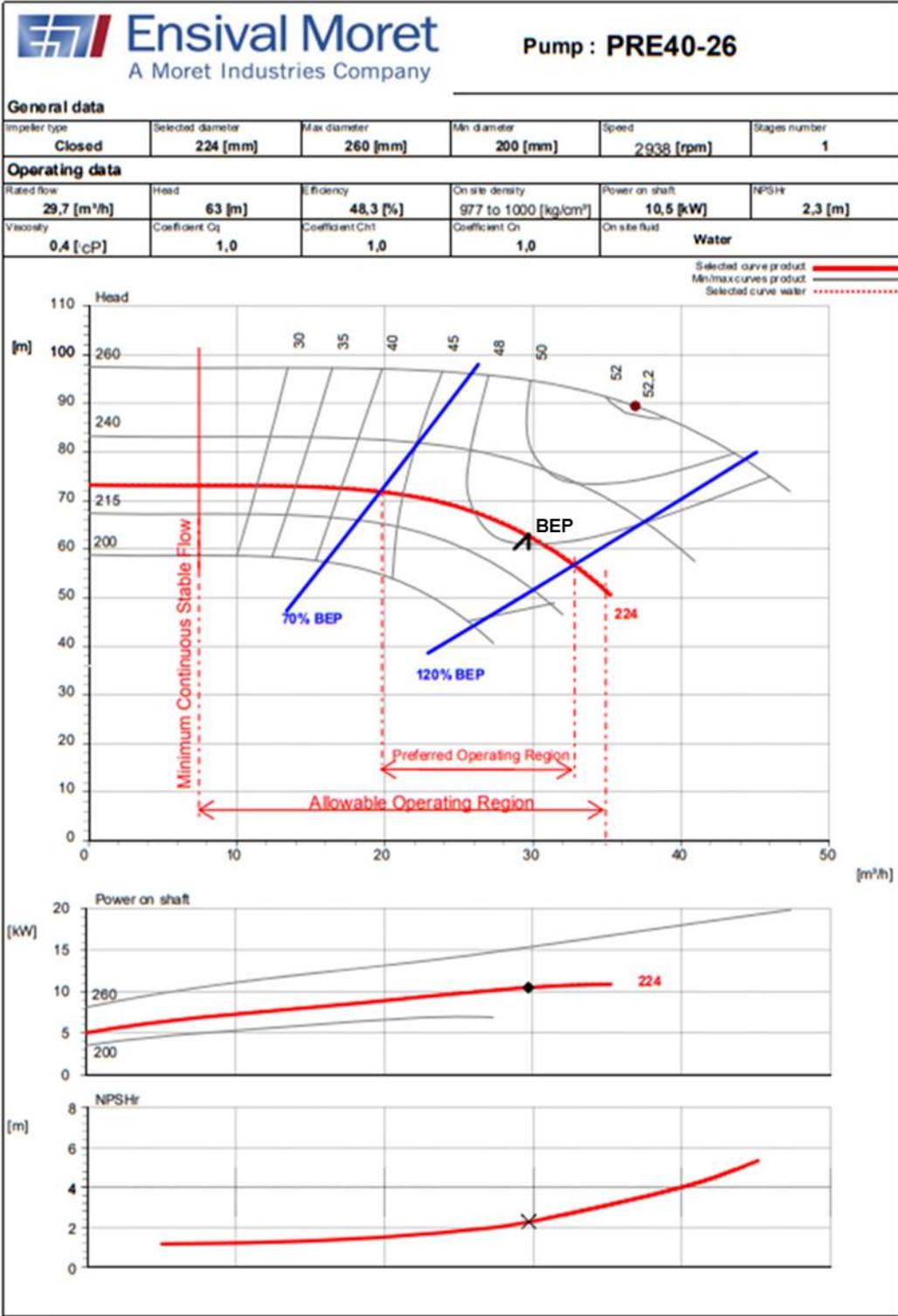
- SR-P-1313 A
- SR-P-1313 B
- SR-P-1312 B
- GA-P-313 A
- SW-P-1415 A
- SW-P-1415 B
- SW-P-1414 A
- SW-P-1414 B

Se consiguió información de cada bomba junto a sus curvas características y demás datos aportados por el fabricante.

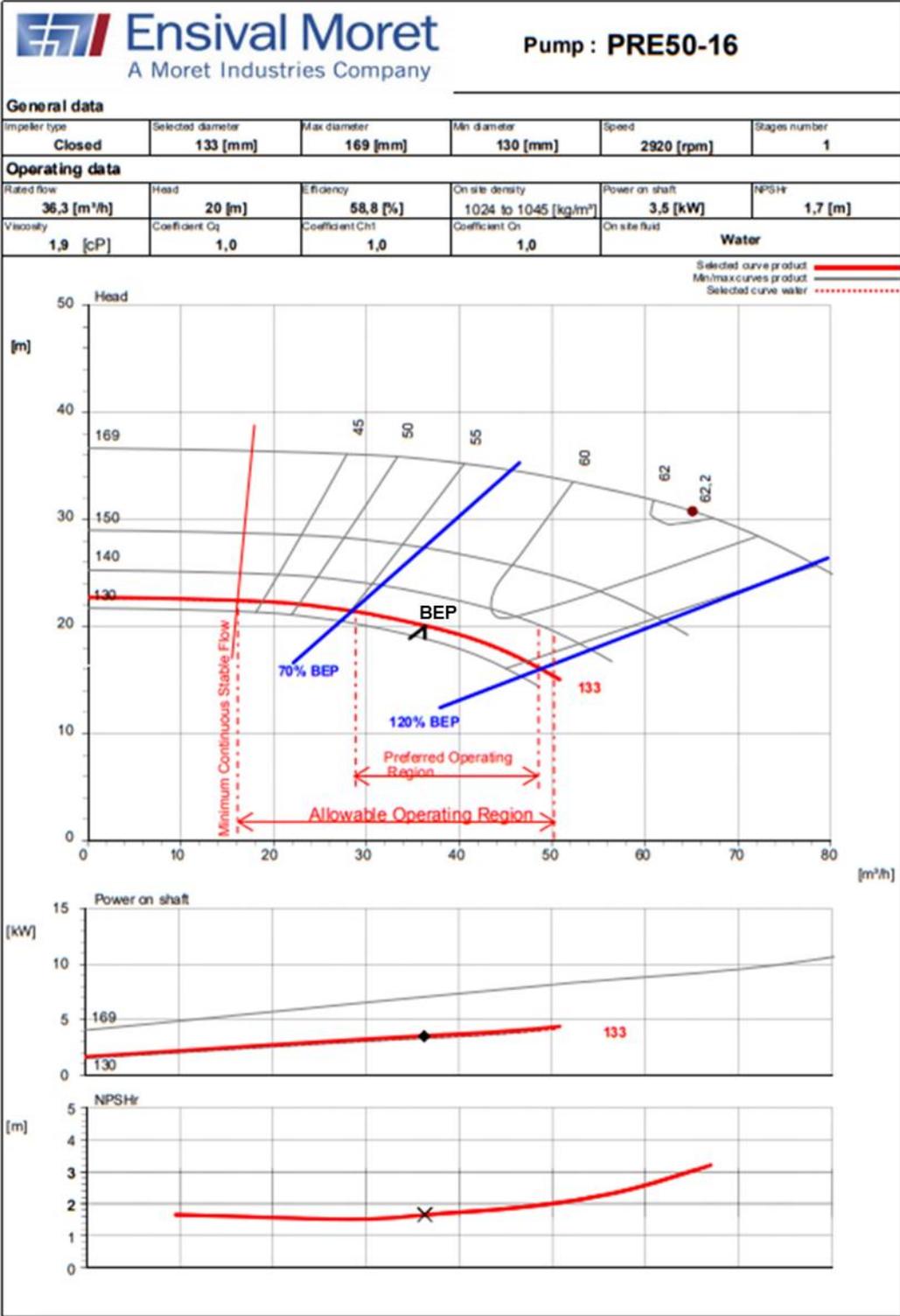
5.1 Curva bomba SR-P-1313 A/B



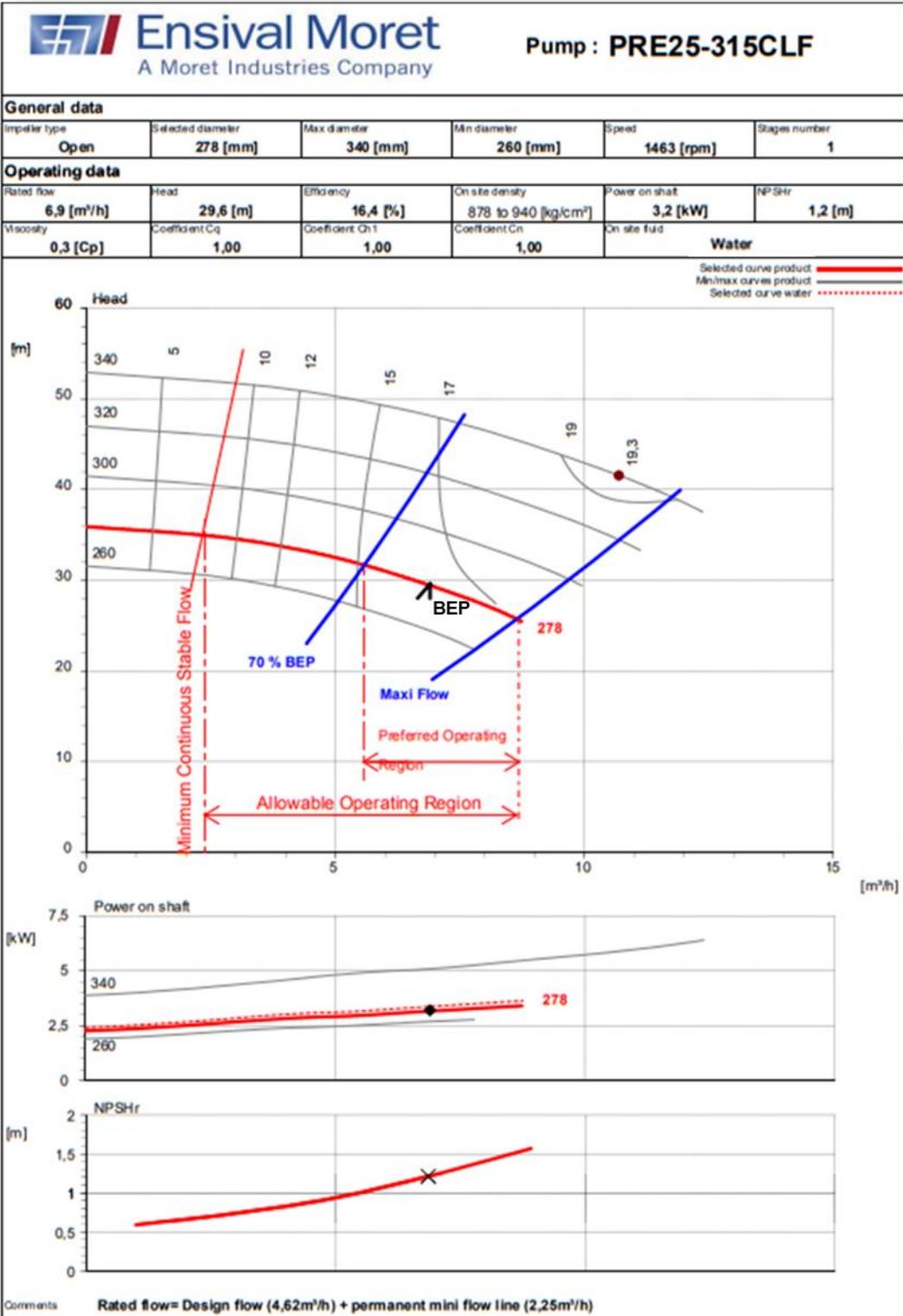
5.2 Curva bomba SR-P-1312 B



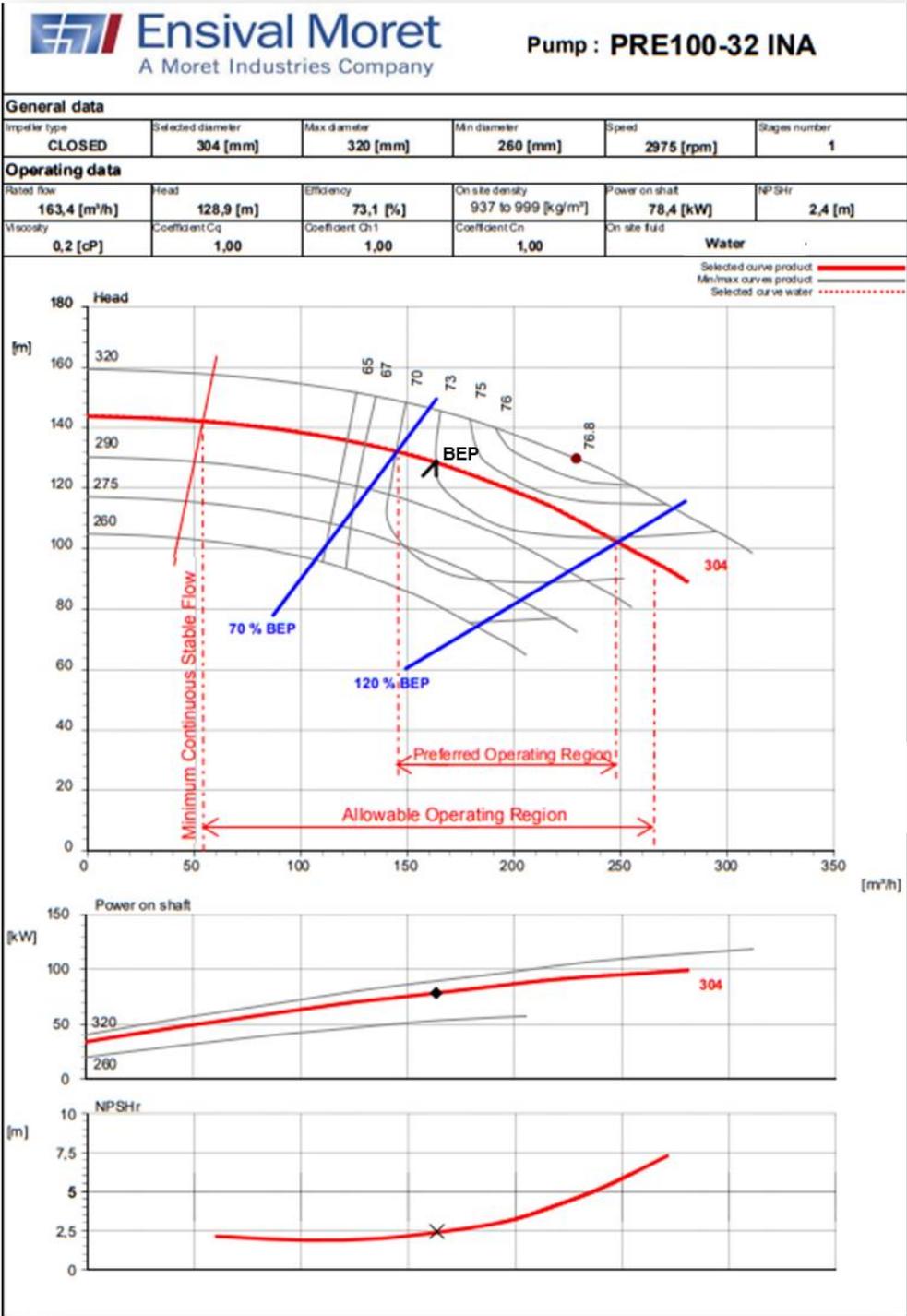
5.3 Curva bomba GA-P-313 A



5.4 Curva bomba SW-P-1415 A/B



5.5 Curva bomba SW-P-1414 A/B



5.6 Herramientas e insumos

Las herramientas e insumos que se utilizaron para el relevamiento de bombas:

Algunas de las imágenes son referenciales.

- 1 valija metálica con un caudalímetro ultrasónico modelo TDS-100H con accesorios.



- Cuaderno para recopilar los datos obtenidos en las mediciones



- 1 medidor de espesores marca Zion NDT, modelo MXG-9 con accesorios.



- 1 cinta pi, modelo 50 – 600mm.



- 1 cutter, marca KDS, modelo GripFit TwistLock L.



- 1 lata de removedor de Pintura en gel de 1kg, marca Remoquim.



- 1 cepillo de acero mango plástico ergonómico 4 x 19, marca Paranetti.



- 6 hojas de tela esmeril, grado 80 / 6 hojas de tela esmeril, grado 120.



- 1 espátula de 2", marca Stanley, modelo 28-081S.



- 0.5 kg de estopa.



- 1 rasqueta, marca Stanley, modelo 28-619



Capítulo VI: Desarrollo o relevamiento de bombas

Este estudio fue realizado con asistencia de Sulzer Turbo Services Argentina S.A.

El servicio fue prestado por dos técnicos especialistas de Sulzer y mi persona encargado de recopilar la información, se realizó en las instalaciones de una refinería cliente de Sulzer desarrollándose durante los días 7, 8, 10 de agosto de 2019.

El trabajo consistió en el estudio del comportamiento dinámico de las bombas previamente mencionadas, en donde se registró el punto de trabajo de las mismas y se las comparó posteriormente con las curvas de presión y caudal aportadas por el fabricante, donde especifican el rango óptimo de funcionamiento de las bombas.

Cabe destacar que la planta se encuentra todavía en etapa de construcción, por lo que las condiciones de funcionamiento de las bombas no reflejan a un cien por ciento las condiciones de trabajo que tendrán en un futuro.

6.1 Estudio del comportamiento dinámico de bombas en planta

Para realizar el trabajo, en primera instancia se recorrió las cañerías de succión y descarga de la bomba del circuito cerrado que se utilizó para realizar los ensayos. En dicha recorrida, se buscó una zona apta para ubicar el instrumento de medición de caudal por ultrasonido.

Se tuvo que ubicar una zona donde haya una distancia del instrumento al accesorio más cercano de 10 diámetros aguas arriba y aguas abajo. Una vez hallado el lugar, se procedió a remover la pintura de la cañería para garantizar una buena señal del instrumento.

Posteriormente se tomaron mediciones de diámetro externo y espesor de la cañería. Con estos datos, sumados al material de la cañería y el fluido que se utilizó, se estableció la distancia entre los transductores del instrumento y se comenzó a medir, controlando que tanto la señal como la calidad de la misma estén por arriba de 700 y 60 respectivamente.



DISPOSICIÓN DE TRANSDUCTORES Y MEDICIÓN DE ESPESOR DE BOMBA SR-P-1312 B

Mediciones importantes para el caudalímetro ultrasónico:

Bomba	Diametro exterior [mm]	Espesor [mm]	Diametro interior [mm]	Material de tubería	Fluido	Tipo de transductores	Metodo de colocación	Espacio entre sensores [mm]
SR-P-1313 A	90	9,02	71,96	Acero al C	Agua	Std-M	V	84,53
SR-P-1313 B	90	9,02	71,96	Acero al C	Agua	Std-M	V	84,53
SR-P-1312 B	90	11,12	67,76	Acero al C	Agua	Std-M	V	92,58
GA-P-313 A	168	3,47	161,06	Acero Inox	Agua	Std-M	V	139,05
SW-P-1415 A	60,5	2,83	54,84	Acero Inox	Agua	Std-M	V	32,1
SW-P-1415 B	60,5	2,82	54,86	Acero Inox	Agua	Std-M	V	32,06
SW-P-1414 A	219,8	9,745	200,31	Acero al C	Agua	Std-M	V	213,48
SW-P-1414 B	219,8	9,745	200,31	Acero al C	Agua	Std-M	V	213,48

Luego de colocar los datos en el instrumento de medición de caudal.

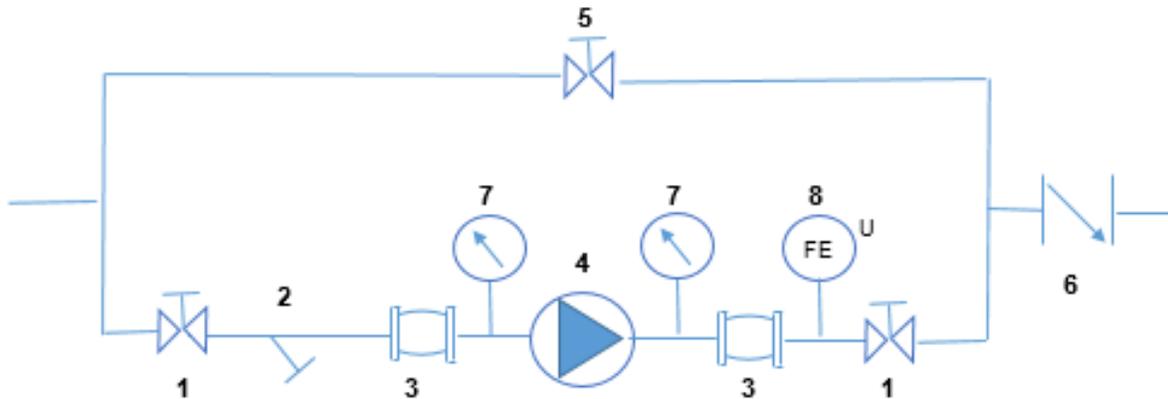
Se tomaron mediciones en lapsos de 10 a 15 minutos de caudal con el instrumento instalado y presión con los manómetros de succión y descarga de las bombas. Adicionalmente se controló la potencia eléctrica consumida y el régimen de giro.

Por último, se verificó para qué apertura de válvulas reguladoras y bypass corresponde dicha medida.

Al obtener los resultados, se verificó en qué punto de la curva se encuentra trabajando la bomba.

A continuación, se muestra una tabla con todas las mediciones realizadas por cada bomba.

6.2 Mediciones de campo



Esquema de la instalación de una bomba, disposición de válvulas.

- 1: Válvulas estranguladoras
- 2: Filtro
- 3: Amortiguadores
- 4: Bomba centrífuga
- 5: Válvula bypass
- 6: Anti retorno
- 7: Manómetros
- 8: Caudalímetro ultrasónico

SR-P-1313 A

Bomba		SR-P-1313 A								
N°	Horario	P in [kg/cm ²]	P out [kg/cm ²]	Delta P [kg/cm ²]	Delta P [m]	Caudal [m ³ /h]	Valv. Reguladora [%]	Valv. Bypass [%]	Potencia activa [kW]	Temperatura del fluido [C°]
1	14:40	0,62	11,1	10,48	104,8	9,5	100	0	12	20
2	14:45	0,62	11	10,38	103,8	9,8	100	0	12	20
3	15:00	0,62	11	10,38	103,8	10,3	100	0	12	19
4	15:10	0,62	11	10,38	103,8	10,5	100	0	12	20
5	15:20	0,62	10,8	10,18	101,8	10,8	100	0	12	19
6	15:30	0,62	10,8	10,18	101,8	10,5	100	0	12	20
7	15:40	0,62	10,8	10,18	101,8	10,45	100	0	12	20
8										
Final										

SR-P-1313 B

Bomba		SR-P-1313 B								
N°	Horario	P in [kg/cm2]	P out [kg/cm2]	Delta P [kg/cm2]	Delta P [m]	Caudal [m3/h]	Valv. Reguladora [%]	Valv. Bypass [%]	Potencia activa [kW]	Temperatura del fluido [C°]
1	16:35	0,71	11,8	11,09	110,9	8,38	100	0	12	20
2	16:55	0,7	11	10,3	103	9,9	100	0	12	20
3	17:15	0,7	10,2	9,5	95	11,41	100	0	12	19
4	17:35	0,7	10,4	9,7	97	10,98	100	0	12	20
5	17:55	0,7	10,4	9,7	97	11,03	100	0	12	22
6	18:10	0,7	10,4	9,7	97	11	100	0	12	20
7										
8										
Final										

SR-P-1312 B

Bomba		SR-P-1312 B								
N°	Horario	P in [kg/cm2]	P out [kg/cm2]	Delta P [kg/cm2]	Delta P [m]	Caudal [m3/h]	Valv. Reguladora [%]	Valv. Bypass [%]	Potencia activa [kW]	Temperatura del fluido [C°]
1						10	100	0	10,3	18
2	10:15	0,75	7,9	7,15	71,5	10	100	0	10,2	19
3	10:35	0,75	7,9	7,15	71,5	10,55	100	0	10,3	20
4	10:55	0,75	7,4	6,65	66,5	16,4	100	0	10,3	19
5	11:25	0,75	7,4	6,65	66,5	16,1	100	0	10,5	19
6	11:45	0,72	7,5	6,78	67,8	16,9	100	0	10,5	20
7	12:00	0,72	7,5	6,78	67,8	16,3	100	0	10,5	20
8										
Final										

GA-P-313 A

Bomba		GA-P-313 A								
N°	Horario	P in [kg/cm2]	P out [kg/cm2]	Delta P [kg/cm2]	Delta P [m]	Caudal [m3/h]	Valv. Reguladora [%]	Valv. Bypass [%]	Potencia activa [kW]	Temperatura del fluido [C°]
1	10:00					15,4	50	0	3,5	21
2	10:35	3,2	5,1	1,9	19	31,1	100	0	3,5	20
3										
4										
5										
6										
7										
8										
Final										

SW-1415 A

Bomba		SW-1415-A								
N°	Horario	P in [kg/cm ²]	P out [kg/cm ²]	Delta P [kg/cm ²]	Delta P [m]	Caudal [m ³ /h]	Valv. Reguladora [%]	Valv. Bypass [%]	Potencia activa [kW]	Temperatura del fluido [C°]
1	14:00	0,5	2,05	1,55	15,5	9,66	-	-	4,2	19
2	14:05	0,55	1,9	1,35	13,5	9,58	-	-	4,3	20
3	14:20	0,4	1,8	1,4	14	9,6	-	-	4,3	20
4	14:24	0,15	1,45	1,3	13	9,1	-	-	4,2	21
5	14:40	0,8	2,3	1,5	15	9,7	-	-	4,2	21
6	14:55	0,1	1,5	1,4	14	9,6	-	-	4,3	20
7										
8										
Final										

SW-1415 B

Bomba		SW-1415-B								
N°	Horario	P in [kg/cm ²]	P out [kg/cm ²]	Delta P [kg/cm ²]	Delta P [m]	Caudal [m ³ /h]	Valv. Reguladora [%]	Valv. Bypass [%]	Potencia activa [kW]	Temperatura del fluido [C°]
1	15:12	0,45	1,55	1,1	11	9,5	-	-	4,2	20
2	15:20	0,7	4,2	3,5	35	1,88	-	-	3,6	19
3	15:35	0,675	4,2	3,525	35,25	1,89	-	-	3,5	19
4	15:50	0,675	4,2	3,525	35,25	1,9	-	-	3,5	20
5	16:00	0,65	4,2	3,55	35,5	1,94	-	-	3,5	19
6										
7										
8										
Final										

SW-1414 A

Bomba		SW-P-1414 A								
N°	Horario	P in [kg/cm ²]	P out [kg/cm ²]	Delta P [kg/cm ²]	Delta P [m]	Caudal [m ³ /h]	Valv. Reguladora [%]	Valv. Bypass [%]	Potencia activa [kW]	Temperatura del fluido [C°]
1	14:50	0,75	13,6	12,85	128,5	85,8	100	0	61	19
2	15:00	0,7	13,4	12,7	127	104,5	100	0	61	20
3	15:10	0,7	13,2	12,5	125	108,2	100	0	64	20
4	15:15	0,7	13,4	12,7	127	108	100	0	64	19
5	15:30	0,7	13,4	12,7	127	107,9	100	0	64	20
6	15:45	0,7	13,4	12,7	127	107,53	100	0	64	21
7	16:00	0,7	13,4	12,7	127	107,56	100	0	65	20
8										
Final										

SW-1414 B

Bomba		SW-P-1414 B								
N°	Horario	P in [kg/cm ²]	P out [kg/cm ²]	Delta P [kg/cm ²]	Delta P [m]	Caudal [m ³ /h]	Valv. Reguladora [%]	Valv. Bypass [%]	Potencia activa [kW]	Temperatura del fluido [C°]
1	16:20	0,8	13,8	13	130	88,5	100	0	62	20
2	16:40	0,75	13,6	12,85	128,5	100,3	100	0	62	19
3	16:45	0,75	13,6	12,85	128,5	97,7	100	0	62,5	20
4	17:05	0,75	13,6	12,85	128,5	97,5	100	0	63	20
5	17:20	0,75	13,6	12,85	128,5	97,4	100	0	63	19
6	17:30	0,75	13,6	12,85	128,5	97,3	100	0	63	20
7										
8										
Final										

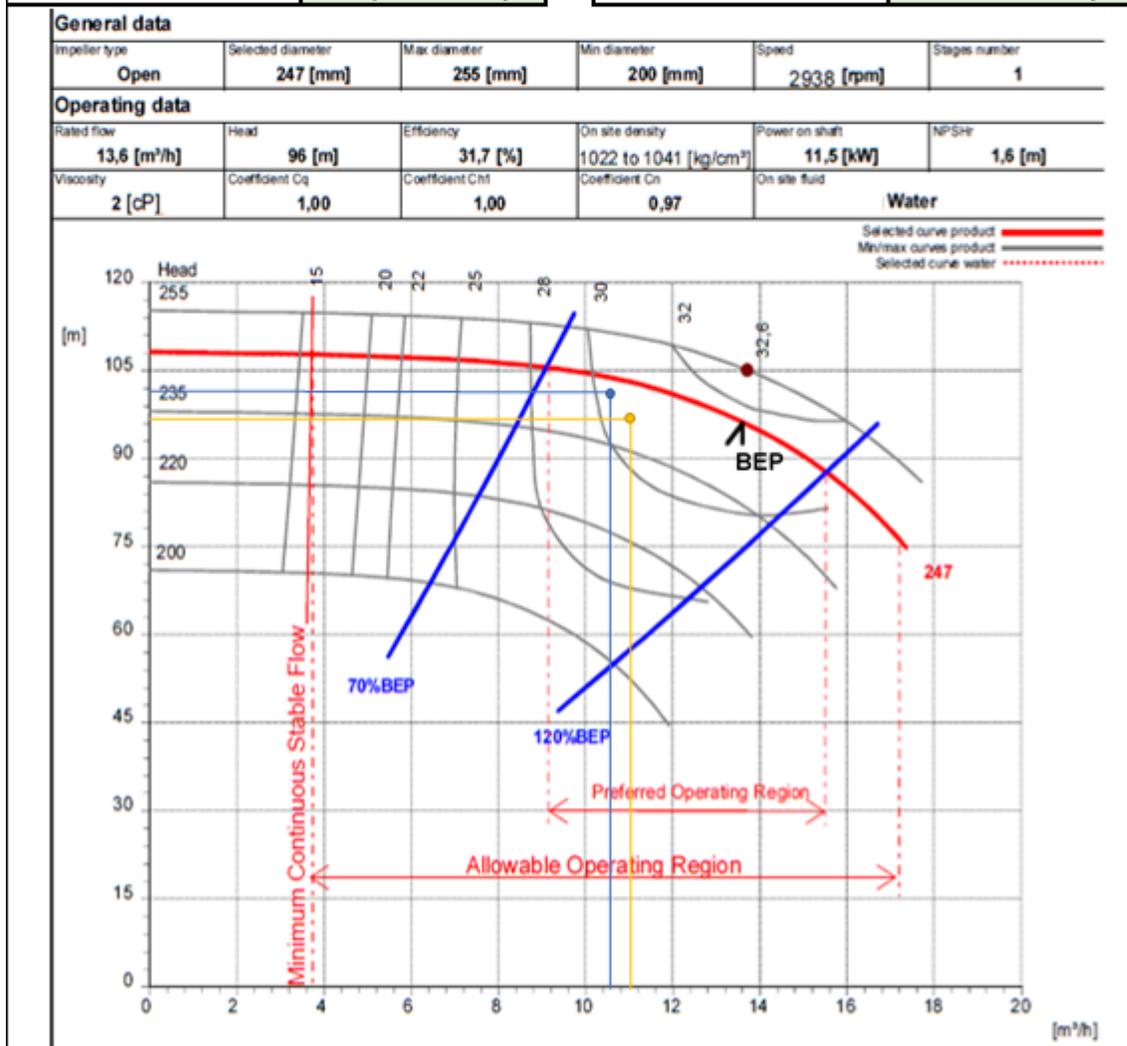
6.3 Tabla resumen de mediciones y punto de funcionamiento de cada bomba

A continuación, un resumen con los parámetros dinámicos obtenidos para las distintas bombas en condición de régimen. Se grafica el punto de funcionamiento de la misma bajo las condiciones correspondientes en cada curva característica correspondiente, y se hace un resumen de los resultados de las mediciones.

6.3.1 Resultado de medición Bomba SR-P-1313 A / B

Modelo Bomba	PRE 25-250D LF
Tag	SR-P-1313 A ●
Presion de succion	6,2 m h2o
Presion de descarga	108 m h2o
Diferencia de presion	101,8 m h2o
Diametro ext	90 mm
Espesor	9,02 mm
Diametro int	71,96 mm
Material de tubería	Acero al carbono
Fluido	Agua
Valvula reguladora	100 %
Valvula bypass	100 %
Potencia	12 kW
RPM	
Caudal	10,45 m3/h

Modelo Bomba	PRE 25-250D LF
Tag	SR-P-1313 B ●
Presion de succion	7 m h2o
Presion de descarga	104 m h2o
Diferencia de presion	97 m h2o
Diametro ext	90 mm
Espesor	9,02 mm
Diametro int	71,96 mm
Material de tubería	Acero al carbono
Fluido	Agua
Valvula reguladora	100 %
Valvula bypass	100 %
Potencia	12 kW
RPM	
Caudal	11 m3/h



Observaciones

Las mediciones fueron tomadas en la cañería de descarga que ambas bombas tienen en común. En primer lugar, se analizó la bomba SR-P-1313 A, donde el personal de operaciones realizó pruebas con la válvula reguladora para constatar su correcto funcionamiento.

Se decidió operar con la válvula reguladora a un 100%, obteniendo resultados satisfactorios y observando que, bajo esas condiciones, la bomba trabaja en la zona preferencial de operación. Punto de funcionamiento señalado con un punto azul.

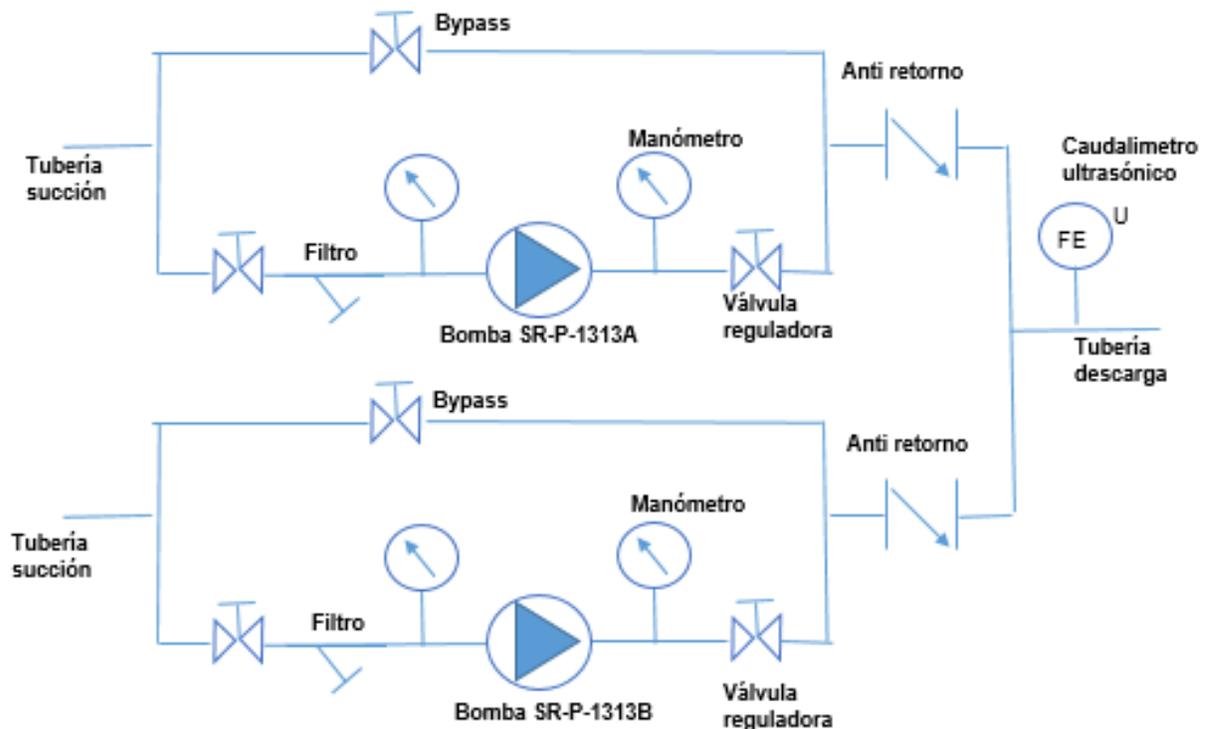
En cuanto a la SR-P-1313 B, se trabajó con la misma condición mencionada anteriormente. Así, la bomba opera también en la zona preferencial de operación.

Punto de funcionamiento señalado con un punto amarillo.

Por esto, no es necesario hacer una optimización en estas dos bombas. Están trabajando en buenas condiciones.

Cabe aclarar que, operativamente las bombas trabajan independientemente y no en paralelo. Al ser bombas gemelas, trabajan como reserva, una es respaldo de la otra.

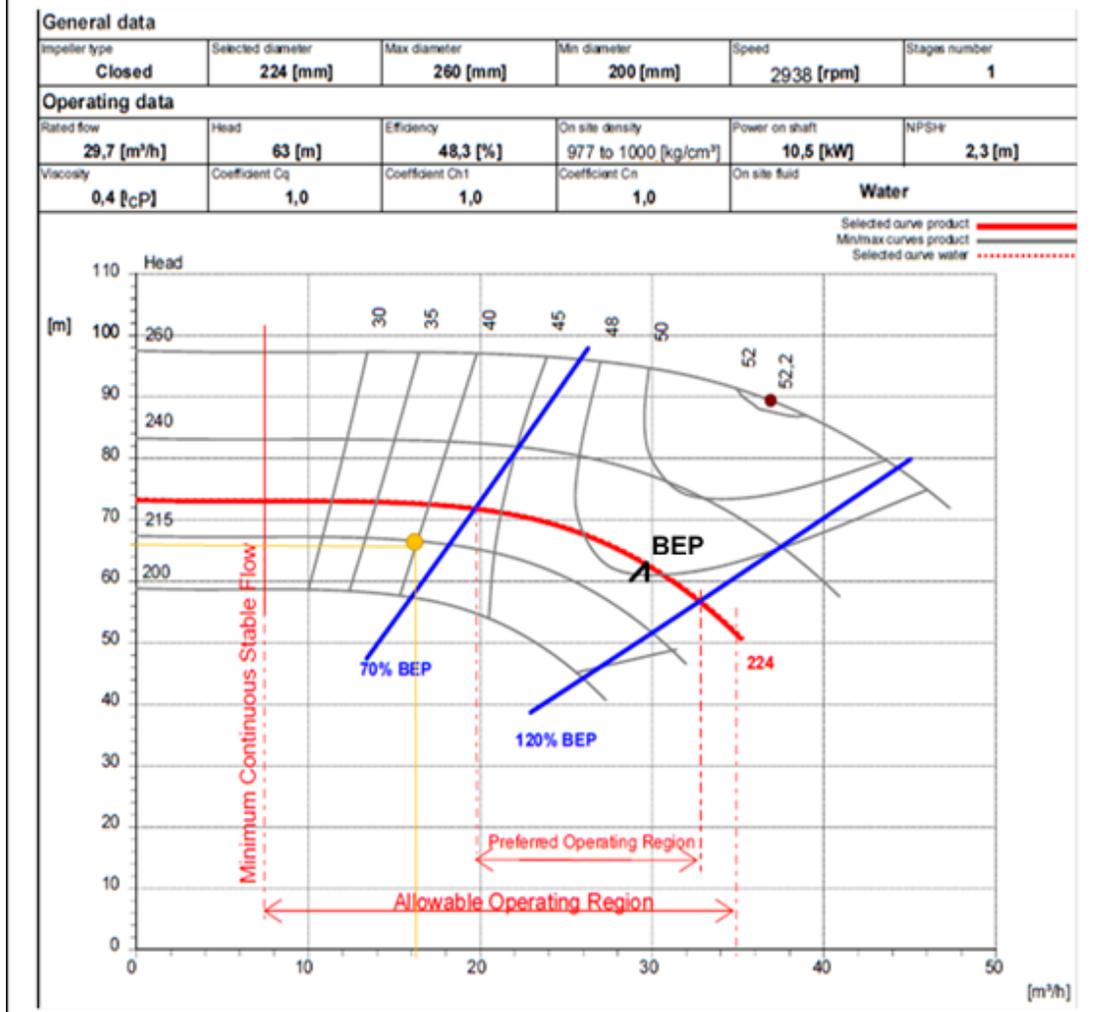
No está previsto que funcionen en paralelo.



Esquema de la instalación bombas SR-P-1313 A/B.

6.3.2 Resultado de medición Bomba SR-P-1312 B

Modelo Bomba	PRE 40-26
Tag	SR-P-1312 B ●
Presion de succion	7,2 m h2o
Presion de descarga	75 m h2o
Diferencia de presion	67,8 m h2o
Diametro ext	90 mm
Espesor	11,12 mm
Diametro int	67,76 mm
Material de tubería	Acero al carbono
Fluido	Agua
Valvula reguladora	100 %
Valvula bypass	100 %
Potencia	10,5 kW
RPM	2935
Caudal	16,3 m3/h



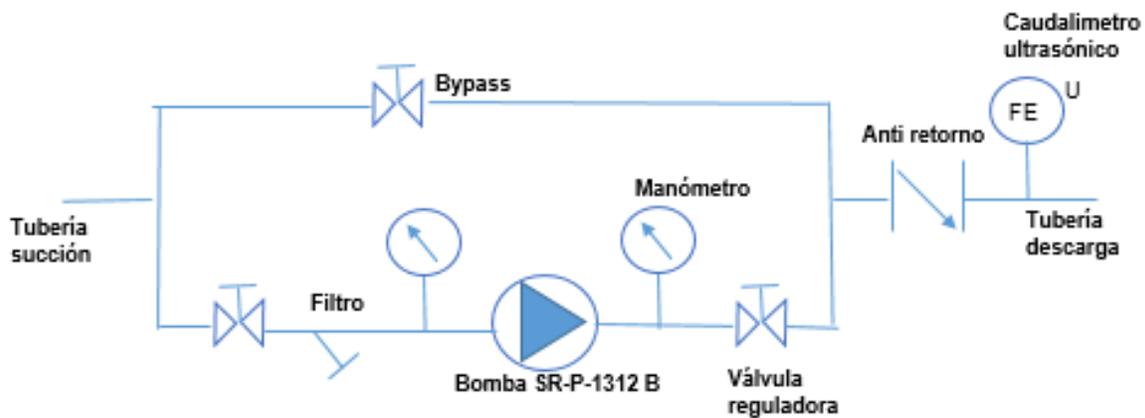
Observaciones

Con la bomba SR-P-1312 B se realizó la medición con la válvula reguladora abierta a un 100%.

Se pudo observar que la bomba está trabajando con un caudal de $16,3 \text{ m}^3/\text{h}$ y una altura de $67,8 \text{ m}$. Punto de funcionamiento señalado con un punto amarillo.

En esta situación, la bomba se encuentra fuera de la zona preferencial de uso, pero dentro de la zona permitida de operación, obteniendo una eficiencia menor que la deseada.

Vemos que está lejos de acercarse al punto de máxima eficiencia, por lo cual es necesario una mejora.



Esquema de la instalación bombas SR-P-1312 B.

6.3.3 Resultado de medición Bomba GA-P-313 A

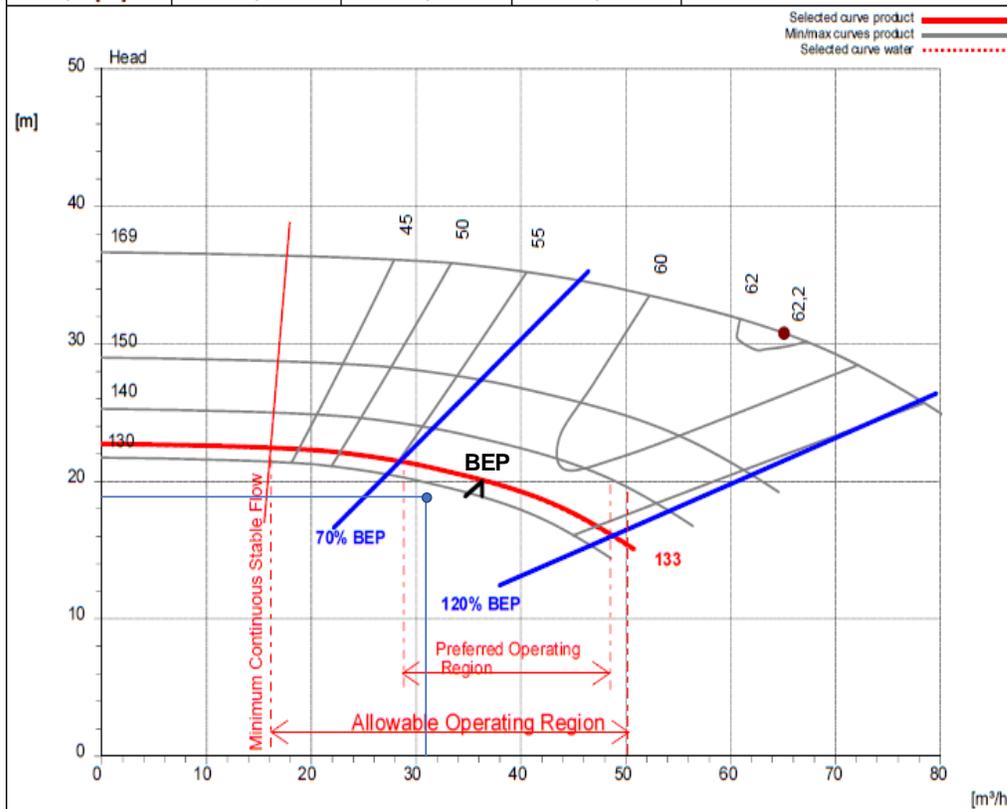
Modelo Bomba	PRE 50-16
Tag	GA-P-313 A ●
Presion de succion	32 m h2o
Presion de descarga	51 m h2o
Diferencia de presion	19 m h2o
Diametro ext	168 mm
Espesor	3,47 mm
Diametro int	161,06 mm
Material de tubería	Acero inoxidable
Fluido	Agua
Valvula reguladora	100 %
Valvula bypass	75 %
Potencia	3,5 kW
RPM	2915
Caudal	31,1 m3/h

General data

Impeller type	Selected diameter	Max diameter	Min diameter	Speed	Stages number
Closed	133 [mm]	169 [mm]	130 [mm]	2920 [rpm]	1

Operating data

Rated flow	Head	Efficiency	On site density	Power on shaft	NPSHr
36,3 [m³/h]	20 [m]	58,8 [%]	1024 to 1045 [kg/m³]	3,5 [kW]	1,7 [m]
Viscosity	Coefficient Cq	Coefficient Ch1	Coefficient Cn	On site fluid	
1,9 [cP]	1,0	1,0	1,0	Water	

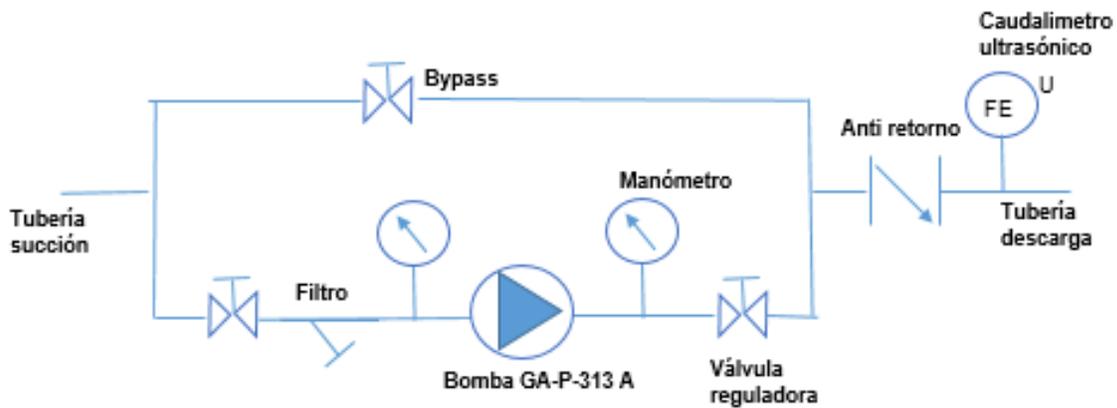


Observaciones

Para la bomba GA-P-313 A, se realizó la medición en donde la válvula reguladora se encontraba abierta en un 100%.

En dicha condición, se observa que el caudal está en 31.1 m³/h en condiciones de régimen y la altura en 19 m. Punto de funcionamiento señalado con un punto amarillo.

Dicho punto de operación se encuentra dentro de la zona de preferencia de uso de la máquina. No es necesario una mejora.

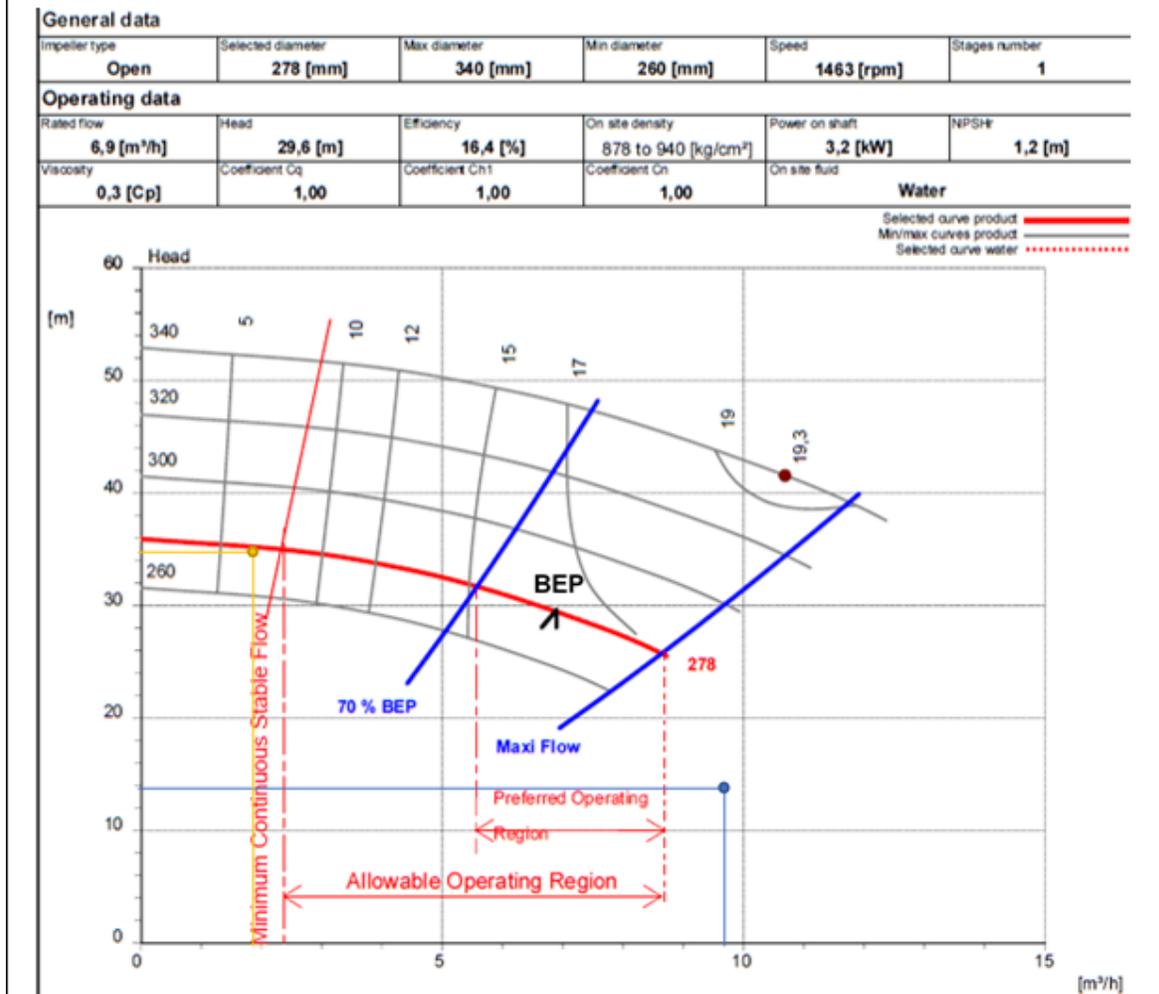


Esquema de la instalación bombas GA-P-313 A

6.3.4 Resultado de medición Bomba SW-P-1415 A / B

Modelo Bomba	PRE 25-315 CLF
Tag	SW-P-1415 A ●
Presion de succion	1 m h2o
Presion de descarga	15 m h2o
Diferencia de presion	14 m h2o
Diametro ext	60,5 mm
Espesor	2,83 mm
Diametro int	54,84 mm
Material de tubería	Acero inoxidable
Fluido	Agua
Valvula reguladora	N/A %
Valvula bypass	N/A %
Potencia	4,2 kW
RPM	1460
Caudal	9,6 m3/h

Modelo Bomba	PRE 25-315 CLF
Tag	SW-P-1415 B ●
Presion de succion	6,5 m h2o
Presion de descarga	42 m h2o
Diferencia de presion	35,5 m h2o
Diametro ext	60,5 mm
Espesor	2,82 mm
Diametro int	54,86 mm
Material de tubería	Acero inoxidable
Fluido	Agua
Valvula reguladora	100 %
Valvula bypass	100 %
Potencia	3,5 kW
RPM	1460
Caudal	1,94 m3/h



Observaciones

Se comienza por realizar los estudios en la bomba SW-P-1415 A. La línea de cañerías de la misma no presenta válvula reguladora ni bypass, sino que posee una placa orificio en la descarga al tanque de agua.

Durante el ensayo de la misma, la bomba trabajo fuera de los parámetros permitidos de operación, obteniendo un caudal elevado. Se mide un caudal de 9.6 m³/h y altura de presión de 14 m. Punto de funcionamiento señalado con un punto azul.

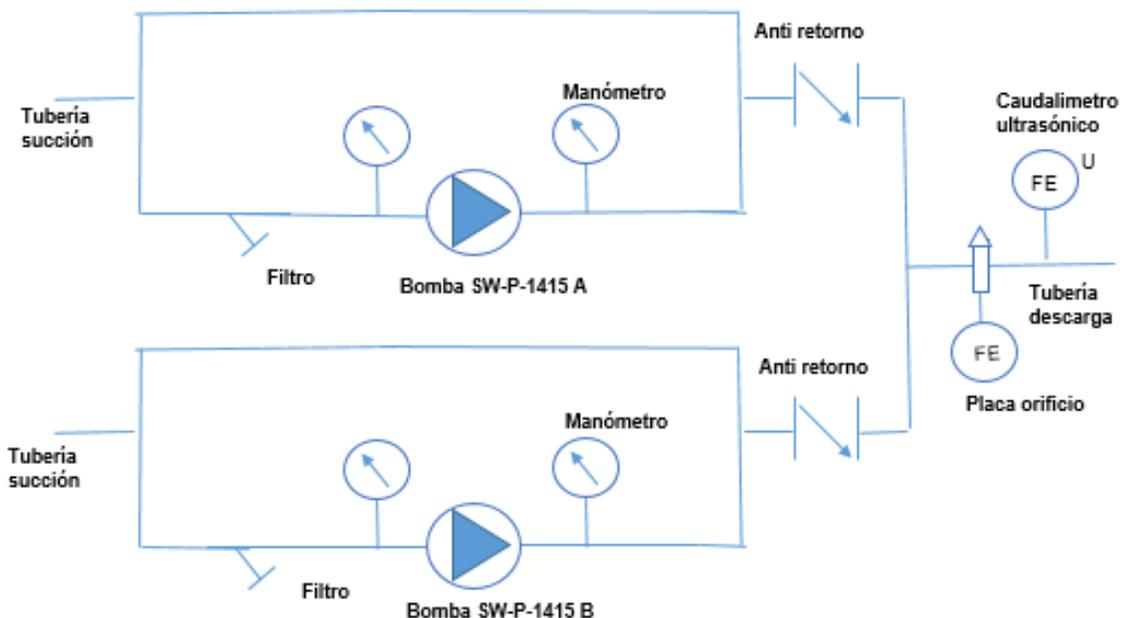
Se pudo observar que esta presión de descarga de la bomba estaba muy baja. Se controló la placa orificio y se descubrió que la misma no estaba instalada. Ante ello se frena el funcionamiento de la misma y se instala la placa orificio correspondiente en el circuito.

Una vez instalada, se ensaya la bomba SW-P-1415 B, obteniendo como consecuencia un caudal de 1.94 m³/h, el cual se encuentra por debajo de mínimo permitido para la operación y una altura de 35,5 m.

Las dos bombas se encuentran trabajando fuera de la zona de preferencia y necesitan una mejora.

Cabe aclarar que, operativamente las bombas trabajan independientemente y no en paralelo. Al ser bombas gemelas, trabajan como reserva, una es respaldo de la otra.

No está previsto que funcionen en paralelo.

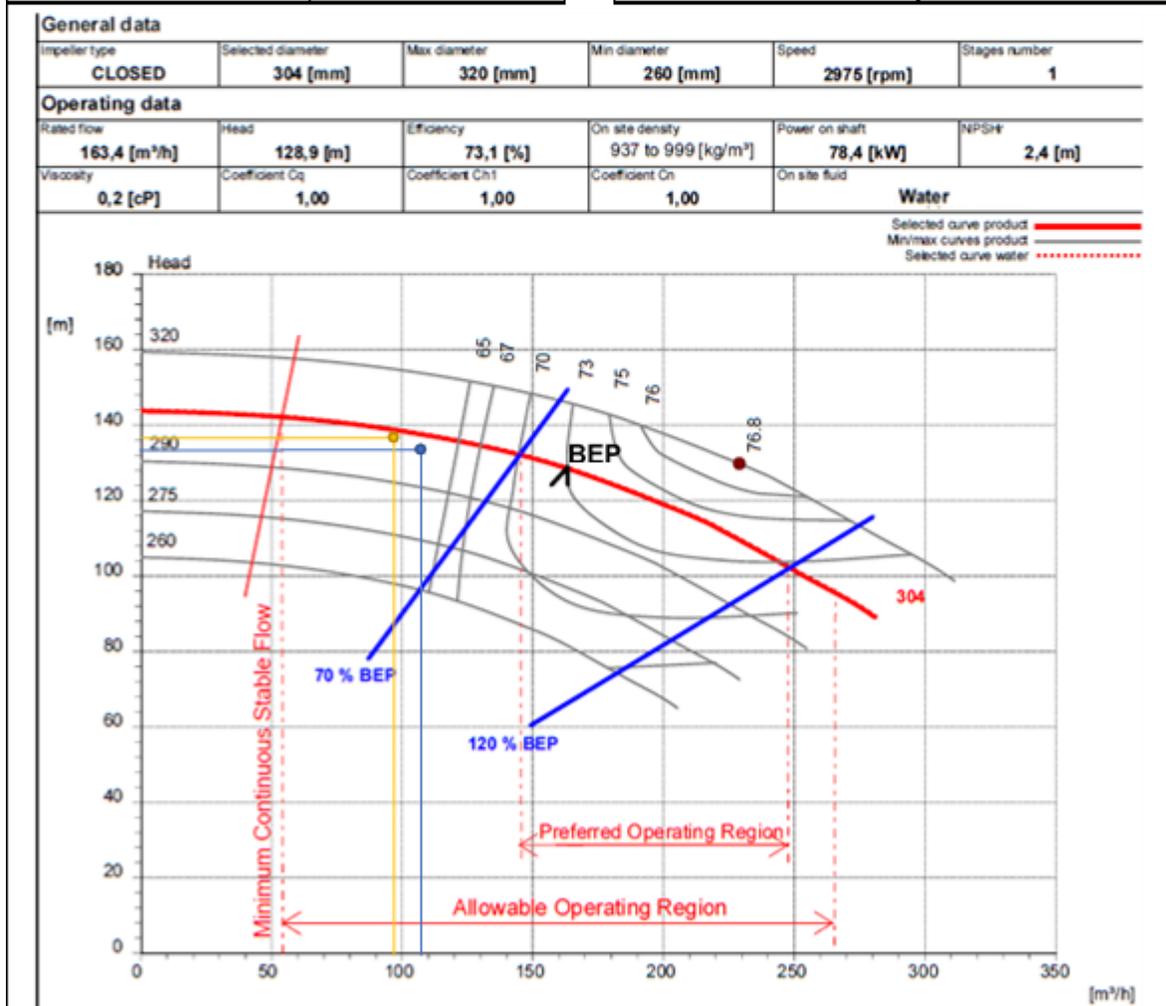


Esquema de la instalación bombas SW-P-1415 A/B

6.3.5 Resultado de medición Bomba SW-P-1414 A / B

Modelo Bomba	PRE 100-32 INA
Tag	SW-P-1414 A ●
Presion de succion	7 m h2o
Presion de descarga	134 m h2o
Diferencia de presion	127 m h2o
Diametro ext	219,8 mm
Espesor	9,745 mm
Diametro int	200,31 mm
Material de tubería	Acero al carbono
Fluido	Agua
Valvula reguladora	100 %
Valvula bypass	100 %
Potencia	65 kW
RPM	2960
Caudal	107,56 m3/h

Modelo Bomba	PRE 100-32 INA
Tag	SW-P-1414 B ●
Presion de succion	7,5 m h2o
Presion de descarga	136 m h2o
Diferencia de presion	128,5 m h2o
Diametro ext	219,8 mm
Espesor	9,745 mm
Diametro int	200,31 mm
Material de tubería	Acero al carbono
Fluido	Agua
Valvula reguladora	100 %
Valvula bypass	100 %
Potencia	63 kW
RPM	2980
Caudal	97,3 m3/h



Observaciones

Comenzando por la bomba SW-P-1414 A, luego de estabilizar el flujo, se obtiene un caudal en régimen de 107.56 m³/h y una altura de 127 m, para la válvula reguladora 100% abierta. Punto de funcionamiento señalado con un punto azul.

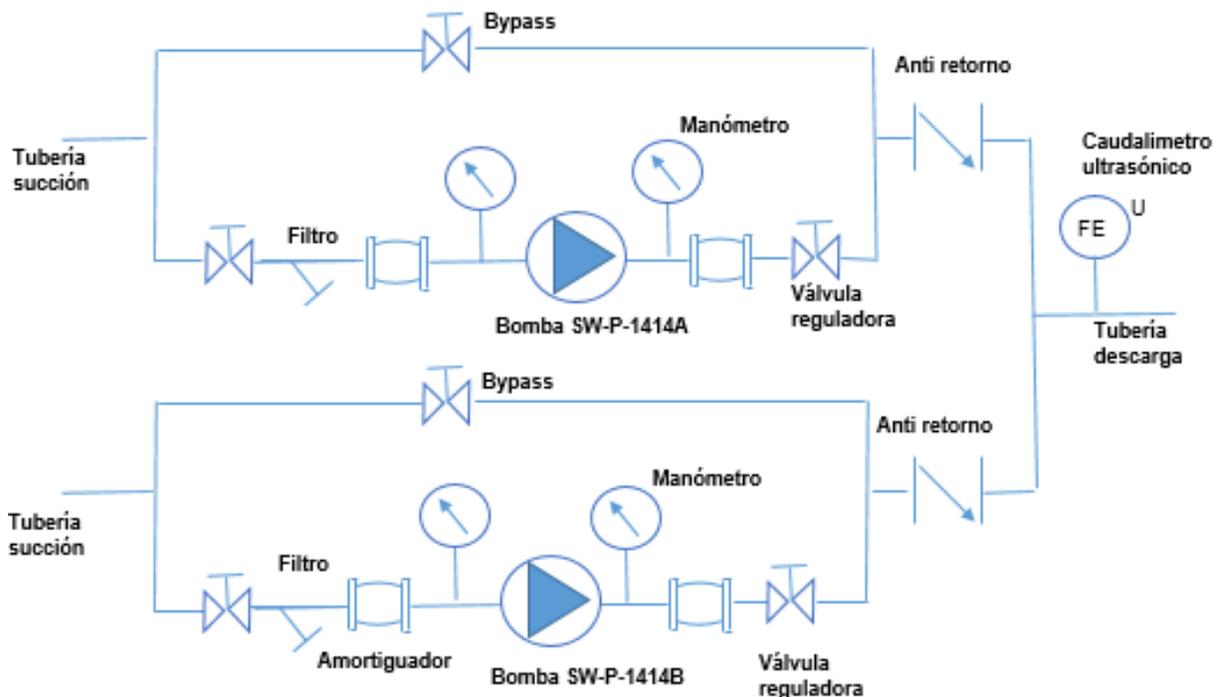
Dicho caudal y altura se encuentra por debajo de la zona de preferencia de uso de la bomba, pero si dentro del régimen operable.

Por otro lado, la bomba SW-P-1414 B, muestra un comportamiento muy similar a la mencionada anteriormente. Se obtiene un caudal en condición de régimen de 97.3 m³/h y una altura de 128,5 m. Punto de funcionamiento señalado con un punto amarillo.

El caudal obtenido se encuentra por debajo de la zona de funcionamiento más eficiente, necesitando así una optimización al igual que la primera.

Cabe aclarar que, operativamente las bombas trabajan independientemente y no en paralelo. Al ser bombas gemelas, trabajan como reserva, una es respaldo de la otra.

No está previsto que funcionen en paralelo.



Esquema de la instalación bombas SW-P-1414 A/B.

Capítulo VII: Propuestas / Correcciones

7.1 Mejora bomba SR-P-1312 B

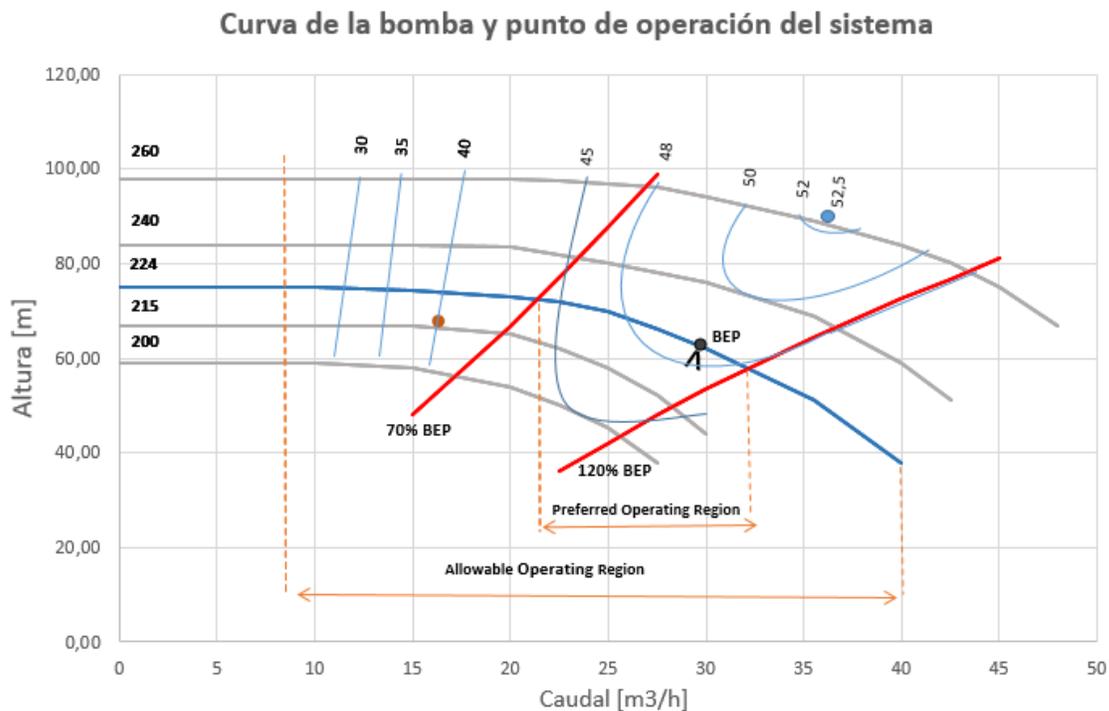
La bomba **SR-P-1312 B** se encuentra fuera de la zona preferencial de uso, pero dentro de la zona permitida de operación, obteniendo una eficiencia menor a la recomendada.

Por lo cual procederemos a ver que método sería mejor para optimizar.

Para esta bomba veremos qué pasa al colocarle un variador de frecuencia, la idea es bajarle las revoluciones a la bomba para llegar a un mejor punto de operación.

Tenemos las leyes de afinidad, con las cuales podemos estimar los valores de caudal y altura que tendría la misma bomba con una velocidad distinta.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3$$



El punto de funcionamiento de esta bomba está identificado con un punto café y tiene los valores de:

Caudal = 16,3 m³/h = Q1

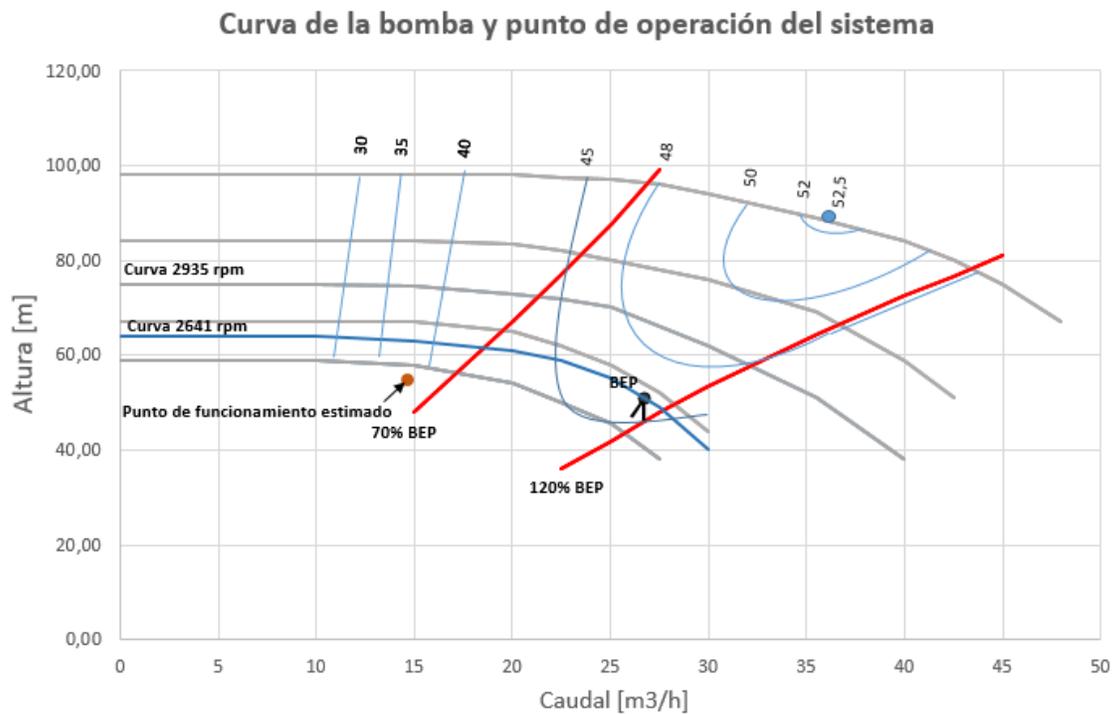
Altura = 67,8 m = H1

Potencia = 10,5 kW = P1

Velocidad = 2935 rpm = N1

Procedemos a disminuir la velocidad al variador sustituyendo N2 por otra velocidad menor a N1, probamos bajarle un 10% su velocidad, N2 = 2641 rpm.

Con las leyes de afinidad se va estimar los valores de caudal y altura, los cuales están representados por el punto café nuevamente.

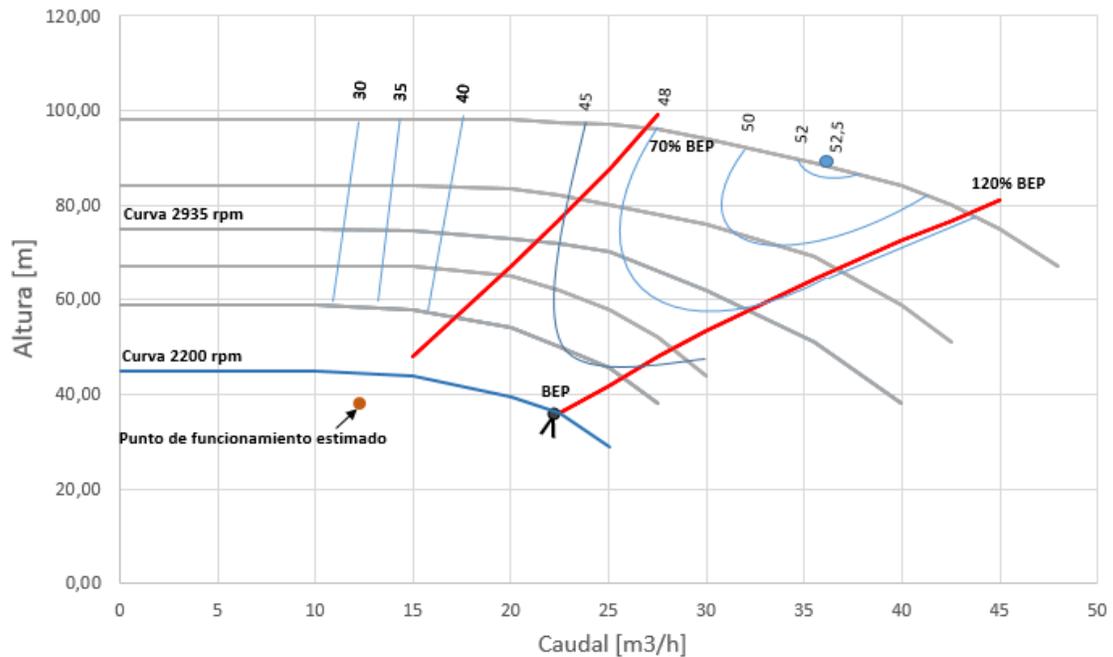


Vemos como los dos puntos bajaron en la curva, pero están lejos de acercarse.

Ahora probamos con el valor mínimo que es aconsejable bajar que es un 25%, N2= 2200 rpm

Al bajar más del 75% de su capacidad aparecen problemas de sobrecalentamientos en el variador de frecuencia.

Curva de la bomba y punto de operación del sistema



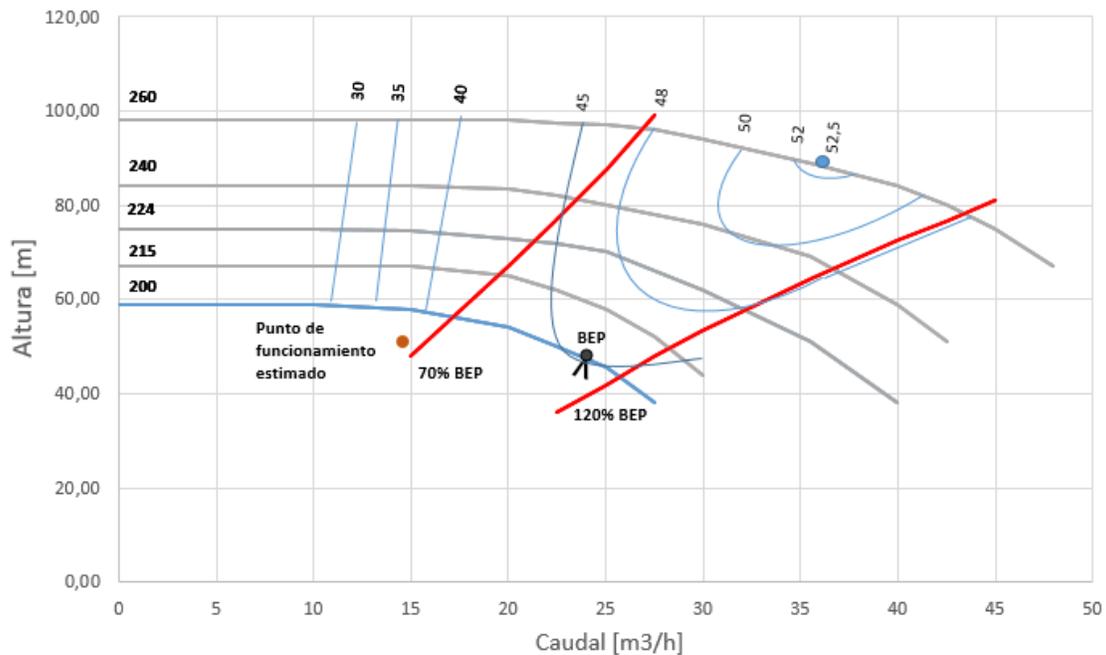
Podemos observar que el punto de funcionamiento está lejos de coincidir con el BEP, y se agregó otra cuestión, ahora la bomba está trabajando fuera de la zona permitida de operación.

Por lo cual, no es posible mejorar esta bomba con un variador.

Si intentamos acortar el impulsor va pasar algo parecido que si lo hiciéramos con el variador.

El diámetro actual es de 224 mm y el diámetro mínimo de esta bomba es de 200 mm. Veremos qué sucede con el punto de funcionamiento y el BEP si recortamos el diámetro al mínimo. El gráfico queda:

Curva de la bomba y punto de operación del sistema



Quedando lejano del BEP. A partir de este diámetro si seguimos acortando el impulsor empiezan a aparecer pérdidas por recirculación.

Por lo tanto, veremos de cambiar la bomba por una que trabaje de manera más eficiente en ese punto de funcionamiento.

7.2 Mejora bombas SW-P-1415 A/B

Las dos bombas **SW-P-1415 A/B** se encuentran trabajando fuera de la zona de preferencia y necesitan una mejora. La instalación no tiene válvula reguladora y bypass, además de no tener una placa de orificio adecuada.

En este caso no se puede resolver el problema con las leyes de afinidad al no tener buenas condiciones en su instalación

Frente a esto, se recomienda instalar una placa orificio con un diámetro mayor al actual de manera tal de reducir parcialmente la presión de descarga de la bomba y aumentar así el caudal.

Las bombas **SW-P-1414 A/B** muestran un comportamiento similar, están necesitando altura para estar en óptimo funcionamiento.

Por lo que procederemos a ver qué sucede si usamos algún método de optimización.

Mejora bombas SW-P-1414 A/B

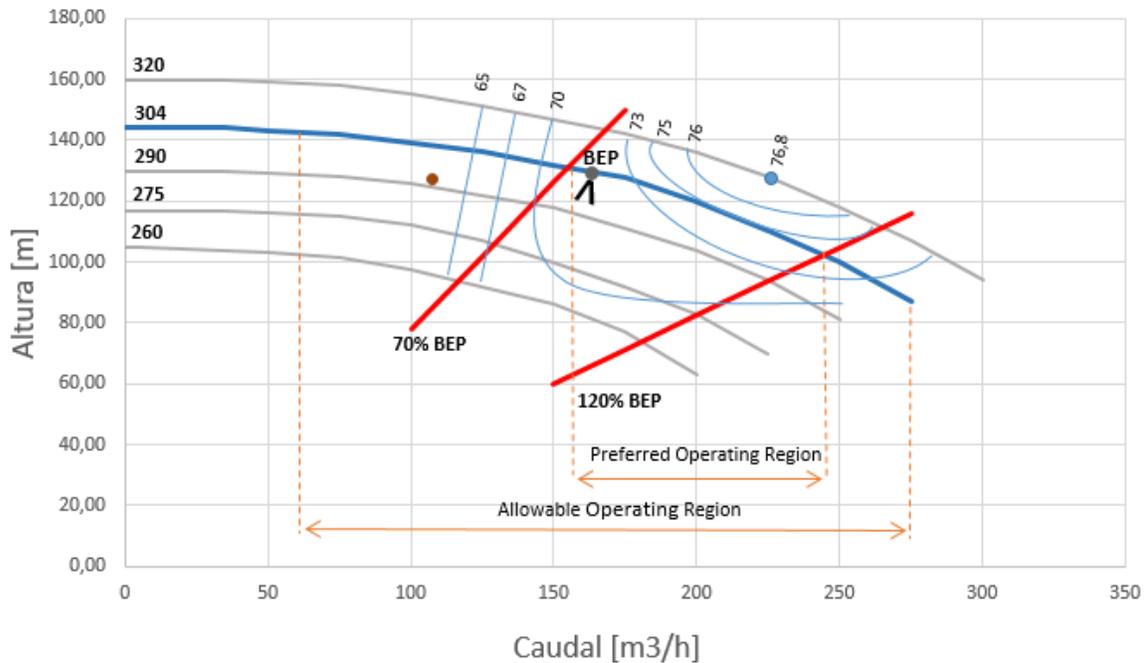
Como las bombas están operando similares, se decidió calcular solo la primer bomba **SW-P-1414 A**.

Colocamos un variador de frecuencia, para disminuir la velocidad de la bomba y poder buscar un punto óptimo.

Tenemos nuevamente las leyes de afinidad.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3$$

Curva de la bomba y punto de operación del sistema



El punto de funcionamiento de esta bomba es:

Caudal = 107,56 m³/h = Q1

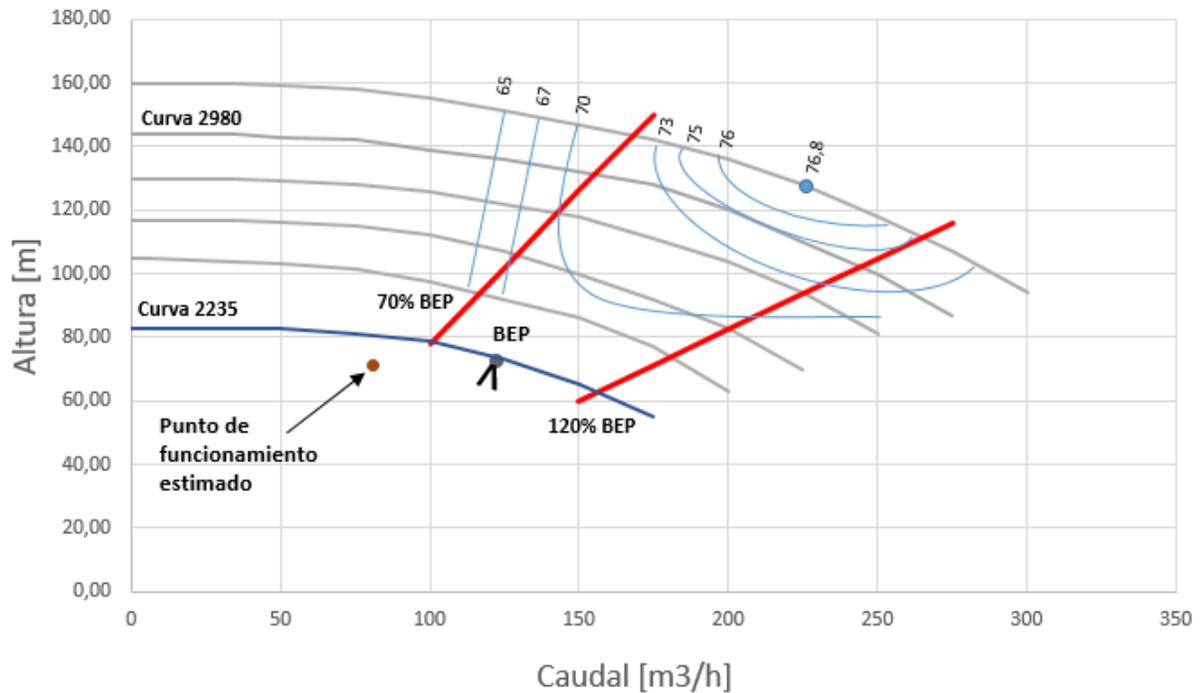
Altura = 127 m = H1

$P1 = 65 \text{ kW} = P1$

Velocidad = 2980 rpm = N1

Colocando estos valores y sustituyendo N2 por otra velocidad menor a N1 con el fin de bajar la curva, le bajamos la velocidad máxima permitida que es un 25% al variador, N2 = 2235 rpm.

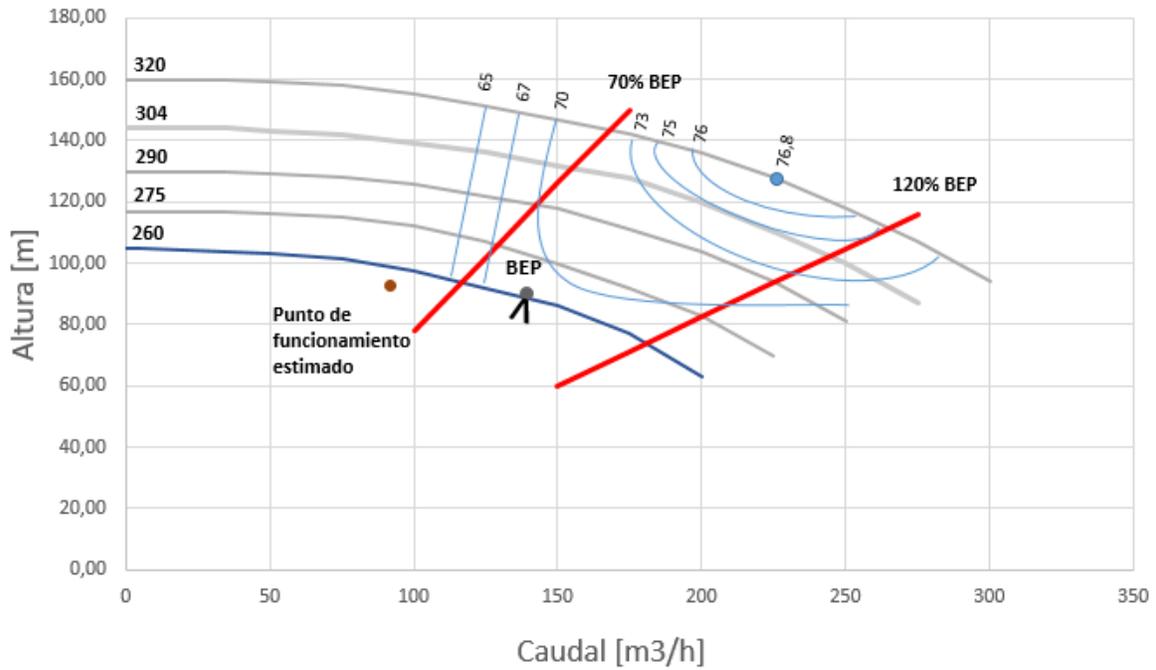
Curva de la bomba y punto de operación del sistema



Con este cambio se puede observar que el punto de funcionamiento bajo, pero no lo suficiente.

Recortando el impulsor pasaría algo parecido, de 0,304 m hasta el mínimo posible que es 0.26 m quedaría así.

Curva de la bomba y punto de operación del sistema



Por lo tanto, nuevamente cambiar la bomba es la mejor opción.

Veremos de cambiar la bomba por una que trabaje de manera más eficiente en ese punto de funcionamiento.

En el siguiente apartado veremos que ahorro económico hay en cambiar una bomba que este adecuada la instalación correspondiente.

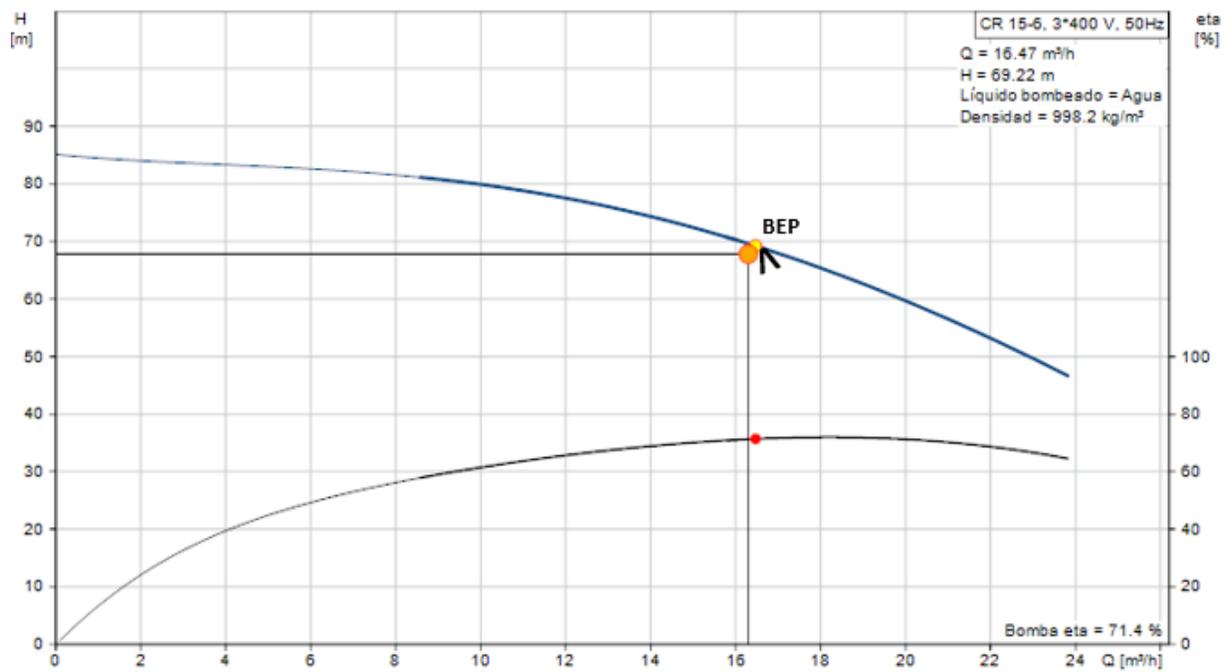
Capítulo VIII: Análisis económico

8.1 Costos Bomba SR-P-1312 B

En este apartado se procederá a elegir una nueva bomba que su punto de eficiencia máximo coincida o se acerque con el punto de funcionamiento.

Se decidió elegir la bomba Grundfos CR15-06, el punto BEP casi coincide con los valores de funcionamiento.

Podemos ver la curva característica de esta bomba junto a su BEP y el punto de funcionamiento de la instalación.



Especificaciones

Caud	16.47	m ³ /h
Alt.	69.22	m
BombaEta	71.4	%
Motor Eta	90.0	%

(Especificaciones adjuntadas en el Anexo 1)

Hacemos una tabla comparativa entre las dos bombas mencionadas. Con los parámetros importantes de ambas.

Características	Bomba SR-P-1312 B	Bomba CR15-06
Caudal [m ³ /h]	16,3	16,47
Altura [m]	67,8	69,22
Líquido bombeado	Agua	Agua
Densidad [kg/m ³] a 20 C°	998,29	998,29
Eficiencia bomba	0,4	0,714
Eficiencia motor	0,94	0,9
Eficiencia variador f	-	-
Servicio de trabajo	Continuo 24 horas	Continuo 24 horas
Costo USD /kWh	0,08	0,08

Para calcular los costos tenemos que saber la potencia eléctrica, esta es la potencia que tomamos de la red.

Primero calculamos la potencia en el eje:

La fórmula es:

$$Peje[Kw] = \frac{Q \left[\frac{m^3}{h} \right] * H[m] * \rho}{367 * \eta_b * \eta_{vf}}$$

Donde:

Q: Caudal expresado en [m³/h]

H: Altura manométrica expresado en [m]

p: Peso específico del líquido expresado en [kg/dm³]

η_b : Eficiencia de la bomba

η_m : Eficiencia del motor

η_{vf} : Eficiencia del variador de frecuencia

Ahora la potencia que se tiene que pagar:

$$Pel\acute{e}ctrica[Kw] = \frac{Peje}{\eta m}$$

La bomba **SR-P-1312 B** está trabajando en estos valores:

Caudal = 16,3 m³/h

H = 67,8 m

$\rho = 998,29 \text{ kg/m}^3$

$\eta_b = 0,4$

$\eta_m = 0,94$ (valor sacado de las especificaciones del motor)

$\eta_{vf} = 1$ (ya que no tiene variador de frecuencia)

Tendríamos:

$$Pel\acute{e}ctrica[Kw] = \frac{16,3 \left[\frac{m^3}{h} \right] * 67,8[m] * \rho}{367 * 0,4 * 0,94 * 1} = 8 Kw$$

Supongamos que el servicio de esta bomba es continuo, las 24 horas, los 365 días del año.

$$Servicio\ continuo = 24 \frac{horas}{dia} * 365\ dias = 8760\ horas$$

Suponemos que el costo de energía por hora es:

$$Costo\ de\ energia = 0,08 \frac{USD}{Kw * hora}$$

Lo que se gastara en un año sera:

$$Consumo\ anual = 8 Kw * 8760\ horas * 0,08 \frac{USD}{Kw * horas} = 5606,4 USD$$

Cambio de bomba: Veremos qué pasa con la bomba Grundfos CR15-06.

Con los nuevos valores repetimos los cálculos:

$$Pel\acute{e}ctrica[Kw] = \frac{16,47 \left[\frac{m^3}{h} \right] * 69,22[m] * \rho}{367 * 0,7 * 0,9 * 1} = 4,93 Kw$$

El consumo anual ahora sería:

$$\text{Consumo anual} = 4,93 \text{ Kw} * 8760 \text{ horas} * 0,08 \frac{\text{USD}}{\text{Kw} * \text{horas}} = 3.454,94 \text{ USD}$$

El ahorro anual sería:

$$\text{Ahorro anual} = 5.606,4 - 3.454,94 = 2.151,46 \text{ USD}$$

La bomba tiene un ciclo de vida de 15 años entonces el ahorro de todo el ciclo de vida de la bomba nos daría:

$$\text{Ahorro en su vida útil} = 15 \text{ años} * 2.151,46 \text{ USD} = 32.271,9 \text{ USD}$$

Consumo energía		
	Consumo anual	Ahorro anual
Bomba antigua	5606,4 USD	2151,46 USD
Bomba nueva	3454,94 USD	
Consumo energía en su vida útil		
	Consumo 15 años	Ahorro 15 años
Bomba antigua	84096 USD	32271,9 USD
Bomba nueva	51821,1 USD	

Tenemos algunos costos extras que tenemos que tener en cuenta, como ser el costo de la bomba nueva y el costo al instalar al hacer modificaciones o adaptaciones en las tuberías al reemplazar esta nueva bomba.

Costos adicionales		
Costo bomba	5412	USD
Costo instalación	2500	USD
Costo total	7912	USD

No se consideró el costo de mantenimiento dado que la bomba antigua como la nueva tienen el mismo costo y no se considera un costo extra.

Ahorro Total = Ahorro en su vida útil – Costo total ciclo vida útil

Ahorro Total = 32.271,9 USD – 7912 USD = 24359,9 USD

Podemos ver que es un ahorro importante, al tratarse de una bomba pequeña no es mucho, pero no deja de ser necesario buscar la optimización.

La tasa de retorno es:

$$Tasa\ de\ retorno\ [años] = \frac{costo\ bomba\ nueva\ [USD] + costo\ instalación\ [USD]}{Ahorro\ anual\ [USD]}$$

$$Tasa\ de\ retorno\ [años] = \frac{5412\ [USD] + 2500\ [USD]}{2.151,46\ [USD]} = 3,6\ años$$

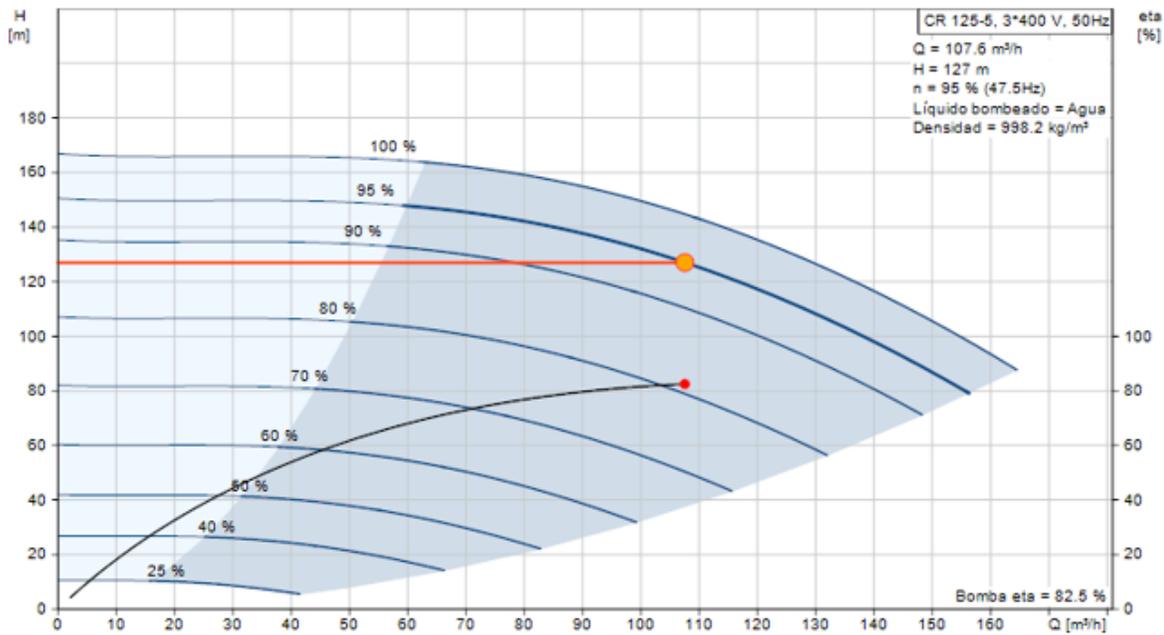
Sabiendo que la bomba tiene una vida útil estimada de 15 años, que la tasa de retorno sea alrededor de 3 años nos da un indicio de que cambiar la bomba por una más eficiente es totalmente rentable y nos trae beneficios a mediano plazo.

8.2 Costos Bomba SW-P-1415 A

Para sustituir esta bomba, se decidió elegir la bomba Grundfos CR125-5.

Podemos ver que la curva característica adecuada para la instalación es con el variador funcionando al 95%.

Tenemos la gráfica:



Especificaciones	
Caudal	107.6 m³/h
Alt.	127 m
BombaEta	82.5 %
Motor Eta	94.4 %

(Especificaciones adjuntadas en el Anexo 1)

Hacemos una tabla comparativa entre las dos bombas mencionadas. Con los parámetros importantes de ambas.

Características	SW-P-1415 A	Bomba CR125-5
Caudal [m³/h]	107,56	107,6
Altura [m]	127	127
Líquido bombeado	Agua	Agua
Densidad [kg/m³] a 20 C°	998,29	998,29
Eficiencia bomba	0,6	0,825
Eficiencia motor	0,96	0,944
Eficiencia variador f	-	0,98
Servicio de trabajo	Continuo 24 horas	Continuo 24 horas
Costo USD /kWh	0,08	0,08

La bomba **SW-P-1415 A** está trabajando en estos valores:

$$\text{Caudal} = 107,56 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H = 127 \text{ m}$$

$$\rho = 998,29 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_b = 0,6$$

$$\eta_m = 0,96 \text{ (dato extraído de las especificaciones del motor)}$$

$$\eta_{vf} = 1 \text{ (ya que no tiene variador de frecuencia)}$$

Tendríamos:

$$\text{Pelétrica[Kw]} = \frac{107,56 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] * 127[\text{m}] * \rho}{367 * 0.6 * 0.96 * 1} = 64,61 \text{ Kw}$$

Supongamos que el servicio de esta bomba es continuo, las 24 horas, los 365 días del año.

$$\text{Servicio continuo} = 24 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} * 365 \text{ dias} = 8.760 \text{ horas}$$

Suponemos que el costo de energía por hora es:

$$\text{Costo de energia} = 0.08 \frac{\text{USD}}{\text{Kw} * \text{hora}}$$

Lo que se gastaría en un año sería:

$$\text{Consumo anual} = 64,61 \text{ Kw} * 8.760 \text{ horas} * 0.08 \frac{\text{USD}}{\text{Kw} * \text{horas}} = 45.278,68 \text{ USD}$$

Cambio de bomba: Veremos qué pasa con la bomba Grundfos CR125-5.

Con los nuevos valores repetimos los cálculos:

Ahora tenemos:

$$\text{Pelétrica[Kw]} = \frac{107,6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] * 127[\text{m}] * \rho}{367 * 0.82 * 0.94 * 0.98} = 49,29 \text{ Kw}$$

El consumo anual ahora sería:

$$\text{Consumo anual} = 49,29 \text{ Kw} * 8.760 \text{ horas} * 0,08 \frac{\text{USD}}{\text{Kw} * \text{horas}} = 34.544,28 \text{ USD}$$

El ahorro anual sería:

$$\text{Ahorro anual} = 45.278,68 - 34.544,28 = 10.734,4 \text{ USD}$$

La bomba tiene un ciclo de vida de 15 años entonces el ahorro de todo el ciclo de vida de la bomba nos daría:

$$15 \text{ años} * 10.734,4 \text{ USD} = 161.016 \text{ USD}$$

Consumo energía		
	Consumo anual	Ahorro anual
Bomba antigua	45.278,68 USD	10.734,4 USD
Bomba nueva	34.544,28 USD	
Consumo energía en su vida útil		
	Consumo 15 años	Ahorro 15 años
Bomba antigua	679.180,2 USD	161.016 USD
Bomba nueva	518.164,2 USD	

Tenemos los costos extras para este caso que, al ser una bomba más grande, aumentan los precios.

Costos adicionales		
Costo bomba	37.445,62	USD
Costo instalación	5800	USD
Costo variador de frecuencia	6800	USD
Costo total	50.045,62	USD

$$\text{Ahorro Total} = \text{Ahorro en su vida útil} - \text{Costo total ciclo vida útil}$$

$$\text{Ahorro Total} = 161.016 \text{ USD} - 50.045,62 \text{ USD} = 110.970,38 \text{ USD}$$

Cuando hablamos de bombas más grandes, se deja ver un ahorro mucho más significativo. Se deja ver que un cambio de bombas trae ahorros económicos a la empresa y que es necesario hacerlo.

La tasa de retorno es:

$$Tasa\ de\ retorno = \frac{\text{costo bomba y variador [USD]} + \text{costo instalación [USD]}}{\text{Ahorro anual [USD]}}$$

$$Tasa\ de\ retorno\ [años] = \frac{37445,62\ [USD] + 6800[USD] + 5800[USD]}{10.734,4\ [USD]} = 4,6\ años$$

Nuevamente podemos ver que es rentable y muy importante cambiar la bomba cuando no se está trabajando correctamente es un gran paso para el ahorro energético que todas las empresas buscan.

Conclusiones

Recordemos que tanto los recursos económicos, como los energéticos son bienes escasos, por tal motivo es importante resaltar el énfasis de este trabajo en buscar la optimización en bombas.

Con frecuencia las personas en una planta se conforman con trabajar con bombas que estén funcionando correctamente pero no eficientemente. Puede que lleguen al caudal y altura que necesitan, pero no se fijan en el potencial ahorro que se puede llegar a conseguir.

En el transcurso de este trabajo, se trabajó con ocho bombas centrífugas de una refinería, se dejó ver que tres de ellas necesitaban una optimización.

Se llegó a la conclusión que colocando un variador de frecuencia o acortando el impulsor no siempre es posible optimizar bombas de acuerdo a su instalación.

Particularmente en las bombas que se analizaron en este trabajo, no fue posible llevarlas a un punto más eficiente usando las leyes de afinidad, se deja ver que si las bombas son muy inadecuadas, no sirve reducir la velocidad o el diámetro del impulsor ya que no se llegará a buenos resultados.

Por otra parte, se demostró que al cambiar por una bomba más adecuada para cada instalación trae ahorros económicos significativos. Sin contar que al trabajar en el punto BEP o cerca, se trabaja con la bomba con su máxima eficiencia, se reducen los mantenimientos y aumenta el ciclo de vida de la bomba.

Se pudo ver que para la bomba Grundfos CR15-6 hay un ahorro total de 24.360 dólares en toda su vida útil contando el costo de la bomba y el costo de modificar o adaptar la instalación para esta nueva bomba.

La otra bomba que se analizó es más grande que la anterior, es la bomba Grundfos CR125-5. Se pudo visualizar que hay un ahorro total de 110.970 dólares en toda su vida útil contando los mismos costos que antes adicionando un variador de frecuencia Grundfos CUE 3X380-500V IP20.

La tasa de retorno de ambas es de 3 años y 4 años respectivamente.

Podemos ver que es un proyecto factible a mediano plazo y que, si la empresa se encarga de optimizar no solo un porcentaje de sus bombas, sino la gran mayoría que lo necesiten, sería una inversión muy buena y que vale la pena totalmente hacer.

Hay que saber también que la mejora no es solo económica, la bomba al trabajar cerca del punto de máxima eficiencia tardará más en deteriorarse por el paso del tiempo, además de tener una operación más segura, las bombas se van a romper menos trabajando cerca del BEP.

Todas estas propuestas y recomendaciones mencionadas, no solo contribuyen a una mejor eficiencia en la instalación y su consecuente ahorro económico, o a un aumento de vida útil de la bomba, sino también a la reducción de la demanda de energía eléctrica y por ende a las emisiones asociadas a su generación.

Anexo 1: Hoja de datos y curvas de las bombas Grundfos
 Bomba Grundfos CR 125-5

GRUNDFOS 		Empresa: Sulzer
		Creado Por: Christian Garcia Agreda
		Teléfono: 72100692
		Datos: 06/10/2021
Contar	Descripción	
1	<p>CR 125-5 A-F-A-V-HQQV</p>  <p style="text-align: center;"><small>Advertir la foto puede diferir del actual producto</small></p> <p>Código: 99142640</p> <p>Bomba centrífuga multietapa para instalación vertical con puertos de aspiración y de descarga al mismo nivel (en línea). El cabezal de la bomba y la base están fabricados en fundición; todas las demás piezas destinadas al contacto con el líquido están fabricadas en acero inoxidable. El cierre mecánico de cartucho de Grundfos garantiza la máxima fiabilidad, permite llevar a cabo la manipulación de forma segura y facilita el acceso y el mantenimiento. La transmisión de potencia tiene lugar por medio de un acoplamiento dividido. La conexión de las tuberías se lleva a cabo por medio de bridas DIN.</p> <p>La bomba está equipada con un motor asíncrono de 3 fases, refrigerado por ventilador y montado sobre soportes.</p> <p>Líquido: Líquido bombeado: Agua Rango de temperatura del líquido: -20 .. 90 °C Densidad: 998.2 kg/m³</p> <p>Técnico: Velocidad predeterminada: 2976 rpm Caudal real calculado: 107.6 m³/h Altura resultante de la bomba: 127 m Orientación de bomba: Vertical Disp. de cierre: Single Código del cierre: HQQV Homologaciones: CE, EAC, UKCA Homologaciones para agua potable: ACS, WRAS Tolerancia de curva: ISO9906:2012 3B</p> <p>Materiales: Base: Ductile cast iron EN 1563 EN-GJS-500-7 ASTM A536-84 65-45-12 Impulsor: Acero inoxidable EN 1.4301 AISI 304 Rodamiento: WC/WC Rodamiento de soporte: Graffon Material certificado conforme a: European standards</p> <p>Instalación: temp. máx. ambiente: 55 °C Presión de trabajo máxima: 25 bar Presión máxima a la temp. declarada: 25 bar / 90 °C</p>	



Empresa: Sulzer
Creado Por: Christian Garcia Agreda
Teléfono: 72100692

Datos: 06/10/2021

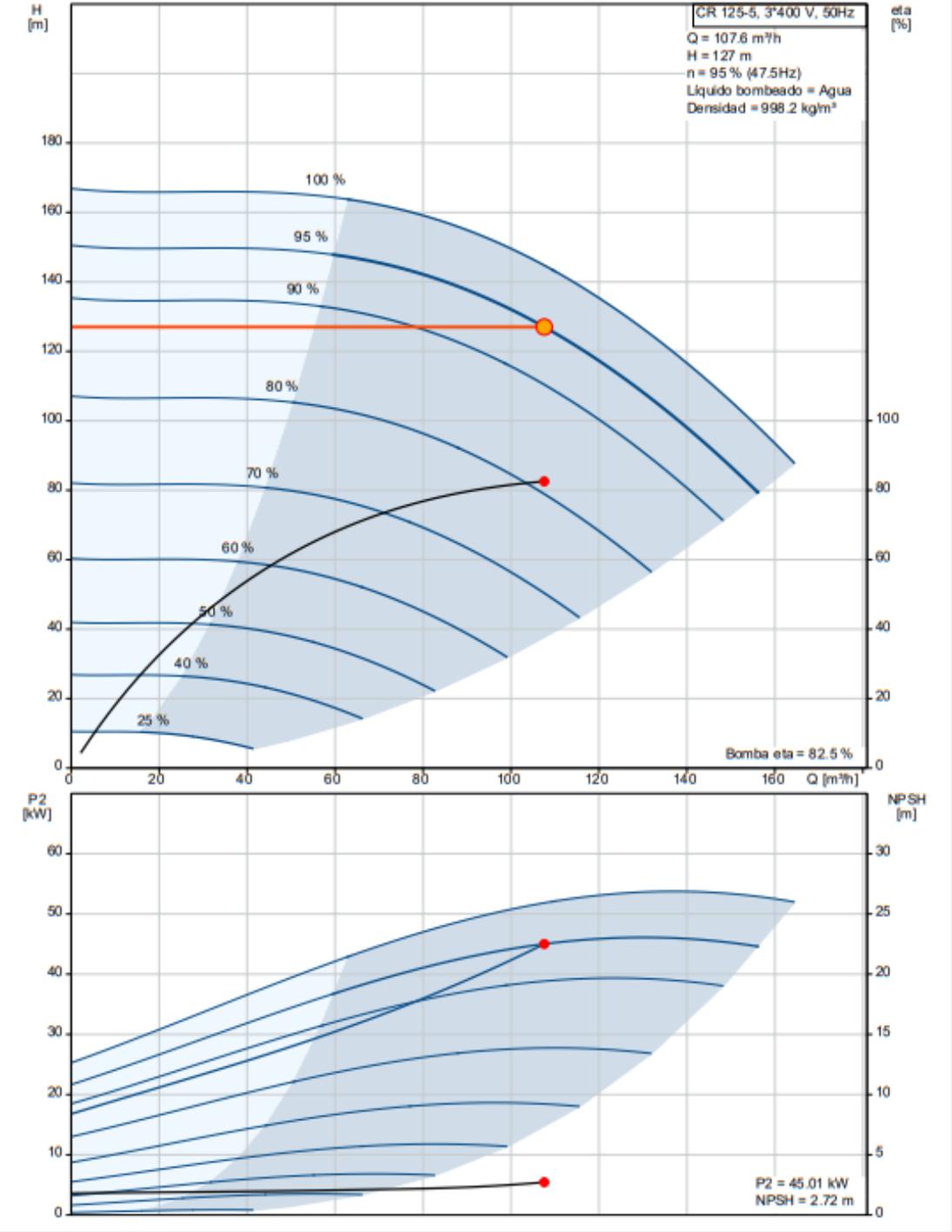
Contar	Descripción
	<p>Tipo de conexión: DIN Tamaño de la conexión de entrada: DN 150 Tamaño de la conexión de salida: DN 150 Presión nominal para la conexión: PN 25/40 Tamaño de la brida del motor: FF500</p> <p>Datos eléctricos: Normativa de motor: IEC Tipo de motor: SIEMENS Clase eficiencia IE: IE3 Potencia nominal - P2: 55 kW Potencia (P2) requerida por la bomba: 55 kW Frecuencia de red: 50 Hz Tensión nominal: 3 x 380-420D/660-725Y V Intensidad nominal: 95/55 A Intensidad de arranque: 670-670 % Cos phi - factor de potencia: 0.89 Velocidad nominal: 2975 rpm Eficiencia: IE3 94,3% Eficiencia del motor a carga total: 94.3-94.3 % Eficiencia del motor a una carga de 3/4: 94.5-94.5 % Eficiencia del motor a una carga de 1/2: 93.9-93.9 % Número de polos: 2 Grado de protección (IEC 34-5): IP55 Clase de aislamiento (IEC 85): F Motor N.º: 81U15338</p> <p>Paneles control: Frequency converter: NONE</p> <p>Otros: Índice de eficiencia mínima, IE min: 0.70 Peso neto: 647 kg Peso bruto: 809 kg Volumen de transporte: 2.48 m³ Dispositivo de gestión de empuje: N País de origen.: DK Tarifa personalizada n.º: 84137075</p>



Empresa: Sulzer
Creado Por: Christian Garcia Agreda
Teléfono: 72100692

Datos: 06/10/2021

99142640 CR 125-5 A-F-A-V-HQQV 50 Hz

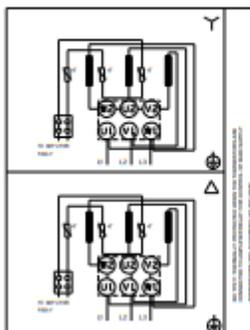
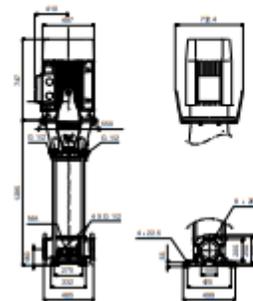
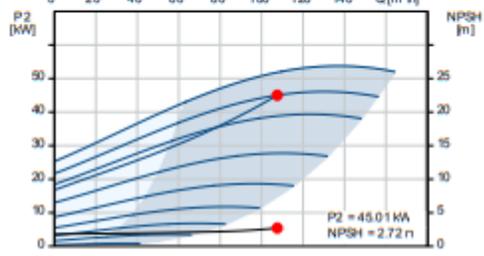
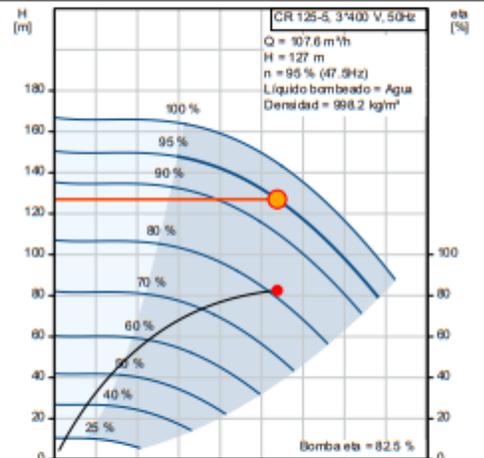




Empresa: Sulzer
Creado Por: Christian Garcia Agreda
Teléfono: 72100692

Datos: 06/10/2021

Descripción	Valor
Información general:	
Producto:	CR 125-5 A-F-A-V-HQQV
Código:	99142640
Número EAN:	5712607541480
Precio:	EUR 32406
Técnico:	
Velocidad predeterminada:	2976 rpm
Caudal real calculado:	107.6 m ³ /h
Altura resultante de la bomba:	127 m
Altura máxima:	166.8 m
Impulsores:	5
Número de impulsores de diámetro reducido:	0
NPSH baja:	N
Orientación de bomba:	Vertical
Disp. de cierre:	Single
Código del cierre:	HQQV
Homologaciones:	CE, EAC, UKCA
Homologaciones para agua potable:	ACS, WRAS
Tolerancia de curva:	ISO9906:2012 3B
Versión de la bomba:	A
Modelo:	A
Enfriamiento:	IC 411
Materiales:	
Base:	Ductile cast iron
Base:	EN 1563 EN-GJS-500-7
Base:	ASTM A536-84 65-45-12
Impulsor:	Acero inoxidable
Impulsor:	EN 1.4301
Impulsor:	AISI 304
Código de material:	A
Código para caucho:	V
Rodamiento:	WC/WC
Rodamiento de soporte:	Grafito
Material certificado conforme a:	European standards
Instalación:	
temp. máx. ambiente:	55 °C
Presión de trabajo máxima:	25 bar
Presión máxima a la temp. declarada:	25 bar / 90 °C
Tipo de conexión:	DIN
Tamaño de la conexión de entrada:	DN 150
Tamaño de la conexión de salida:	DN 150
Presión nominal para la conexión:	PN 25/40
Tamaño de la brida del motor:	FF500
Código de conexión:	F
Líquido:	
Líquido bombeado:	Agua
Rango de temperatura del líquido:	-20 .. 90 °C
Densidad:	998.2 kg/m ³
Datos eléctricos:	
Normativa de motor:	IEC
Tipo de motor:	SIEMENS
Clase eficiencia IE:	IE3
Potencia nominal - P2:	55 kW
Potencia (P2) requerida por la bomba:	55 kW
Frecuencia de red:	50 Hz





Empresa: Sulzer
Creado Por: Christian Garcia Agreda
Teléfono: 72100692

Datos: 06/10/2021

Descripción	Valor
Tensión nominal:	3 x 380-420D/660-725Y V
Intensidad nominal:	95/55 A
Intensidad de arranque:	670-670 %
Cos phi - factor de potencia:	0.89
Velocidad nominal:	2975 rpm
Eficiencia:	IE3 94,3%
Eficiencia del motor a carga total:	94.3-94.3 %
Eficiencia del motor a una carga de 3/4:	94.5-94.5 %
Eficiencia del motor a una carga de 1/2:	93.9-93.9 %
Número de polos:	2
Grado de protección (IEC 34-5):	IP55
Clase de aislamiento (IEC 85):	F
Protección de motor integrada:	PTC
Motor N.º:	81U15338
Paneles control:	
Convertidor de frecuencia:	NONE
Otros:	
Índice de eficiencia mínima, IE min:	0.70
Peso neto:	647 kg
Peso bruto:	809 kg
Volumen de transporte:	2.48 m³
Dispositivo de gestión de empuje:	N
País de origen:	DK
Tarifa personalizada n.º:	84137075

Bomba Grundfos CR 15-6

GRUNDFOS 	
Empresa: Sulzer Creado Por: Christian Garcia Agreda Teléfono: 72100692 Datos: 06/10/2021	
Contar	Descripción
1	CR 15-6 A-A-A-E-HQQE  Advertencia! la foto puede diferir del actual producto Código: 96501909 <p>Bomba centrífuga multietapa para instalación vertical con puertos de aspiración y de descarga al mismo nivel (en línea). El cabezal de la bomba y la base están fabricados en fundición; todas las demás piezas destinadas al contacto con el líquido están fabricadas en acero inoxidable. Un cierre mecánico de cartucho garantiza la máxima fiabilidad, permite llevar a cabo la manipulación de forma segura y facilita el acceso y el mantenimiento. La transmisión de potencia tiene lugar por medio de un acoplamiento dividido. La bomba está equipada con un motor asíncrono de 3 fases, refrigerado por ventilador y montado sobre soportes.</p> <p>Líquido: Líquido bombeado: Agua Rango de temperatura del líquido: -20 .. 120 °C Densidad: 998.2 kg/m³</p> <p>Técnico: Velocidad predeterminada: 2919 rpm Caudal real calculado: 16.47 m³/h Altura resultante de la bomba: 69.22 m Orientación de bomba: Vertical</p>

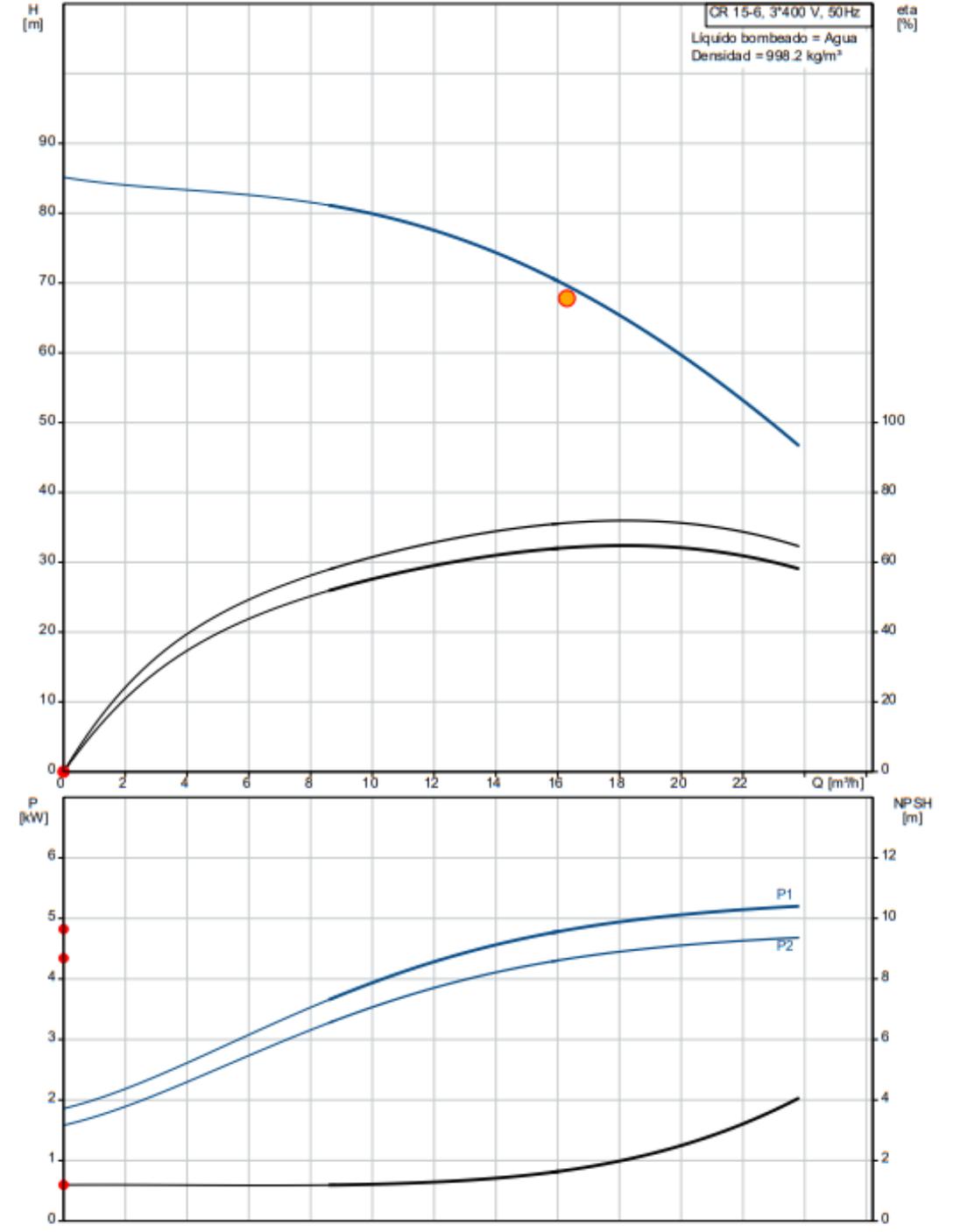
		Empresa: Sulzer Creado Por: Christian Garcia Agreda Teléfono: 72100692 Datos: 06/10/2021
Contar	Descripción	
	Disp. de cierre:	Single
	Código del cierre:	HQQE
	Homologaciones:	CE, EAC, UKCA
	Homologaciones para agua potable:	WRAS, ACS
	Tolerancia de curva:	ISO9906:2012 3B
	Materiales:	
	Base:	Cast iron EN 1561 EN-GJL-200 ASTM A48-25B
	Impulsor:	Acero inoxidable EN 1.4301 AISI 304
	Rodamiento:	SIC
	Instalación:	
	temp. máx. ambiente:	60 °C
	Presión de trabajo máxima:	10 bar
	Presión máxima a la temp. declarada:	10 bar / 120 °C 10 bar / -20 °C
	Tipo de conexión:	Oval / Rp
	Tamaño de la conexión de entrada:	2 inch
	Tamaño de la conexión de salida:	2 inch
	Presión nominal para la conexión:	PN 10
	Tamaño de la brida del motor:	FF265
	Datos eléctricos:	
	Normativa de motor:	IEC
	Tipo de motor:	132SC
	Clase eficiencia IE:	IE3
	Potencia nominal - P2:	5.5 kW
	Potencia (P2) requerida por la bomba:	5.5 kW
	Frecuencia de red:	50 Hz
	Tensión nominal:	3 x 380-415D V
	Intensidad nominal:	11 A
	Intensidad de arranque:	1080-1180 %
	Cos phi - factor de potencia:	0.87-0.82
	Velocidad nominal:	2920-2940 rpm
	Eficiencia:	IE3 89,2%
	Eficiencia del motor a carga total:	89.2 %
	Eficiencia del motor a una carga de 3/4:	90.0 %
	Eficiencia del motor a una carga de 1/2:	89.6 %
	Número de polos:	2
	Grado de protección (IEC 34-5):	55 Dust/Jetting
	Clase de aislamiento (IEC 85):	F
	Motor N.º:	85U17417
	Paneles control:	
	Frequency converter:	NONE
	Otros:	
	Índice de eficiencia mínima, IE min:	0.70
	Peso neto:	91 kg
	Peso bruto:	113 kg
	Volumen de transporte:	0.285 m³
	VVS danés n.º:	385904060
	País de origen.:	HU
	Tarifa personalizada n.º:	84137075



Empresa: Sulzer
Creado Por: Christian Garcia Agreda
Teléfono: 72100692

Datos: 06/10/2021

96501909 CR 15-6 A-A-A-E-HQQE 50 Hz

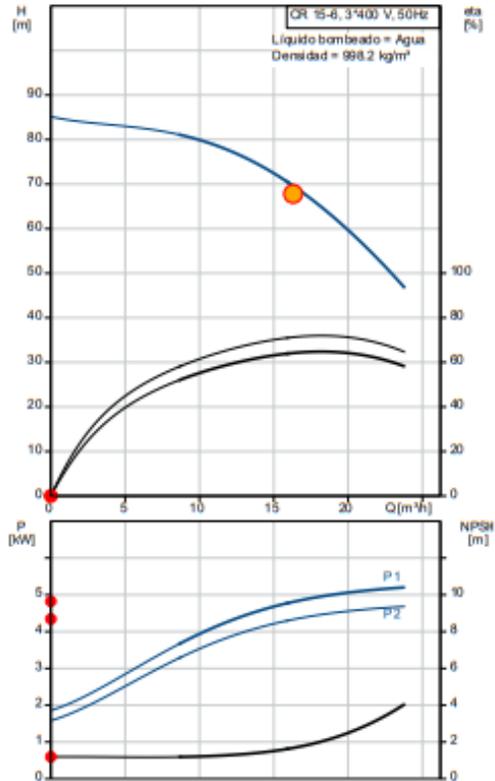




Empresa: Sulzer
Creado Por: Christian Garcia Agreda
Teléfono: 72100692

Datos: 06/10/2021

Descripción	Valor
Información general:	
Producto:	CR 15-6 A-A-A-E-HQQE
Código:	96501909
Número EAN:	5700396231648
Precio:	EUR 4684
Técnico:	
Velocidad predeterminada:	2919 rpm
Caudal real calculado:	16.47 m³/h
Altura resultante de la bomba:	69.22 m
Altura máxima:	84.7 m
Etapas:	6
Impulsores:	6
Número de impulsores de diámetro reducido:	0
NPSH baja:	N
Orientación de bomba:	Vertical
Disp. de cierre:	Single
Código del cierre:	HQQE
Homologaciones:	CE,EAC,UKCA
Homologaciones para agua potable:	WRAS,ACS
Tolerancia de curva:	ISO9906:2012 3B
Versión de la bomba:	A
Modelo:	A
Materiales:	
Base:	Cast iron
Base:	EN 1561 EN-GJL-200
Base:	ASTM A48-25B
Impulsor:	Acero inoxidable
Impulsor:	EN 1.4301
Impulsor:	AISI 304
Código de material:	A
Código para caucho:	E
Rodamiento:	SIC
Instalación:	
temp. máx. ambiente:	60 °C
Presión de trabajo máxima:	10 bar
Presión máxima a la temp. declarada:	10 bar / 120 °C
Presión máxima a la temp. declarada:	10 bar / -20 °C
Tipo de conexión:	Oval / Rp
Tamaño de la conexión de entrada:	2 inch
Tamaño de la conexión de salida:	2 inch
Presión nominal para la conexión:	PN 10
Tamaño de la brida del motor:	FF265
Código de conexión:	A
Líquido:	
Líquido bombeado:	Agua
Rango de temperatura del líquido:	-20 .. 120 °C
Densidad:	998.2 kg/m³
Datos eléctricos:	
Normativa de motor:	IEC
Tipo de motor:	132SC
Clase eficiencia IE:	IE3
Potencia nominal - P2:	5.5 kW
Potencia (P2) requerida por la bomba:	5.5 kW
Frecuencia de red:	50 Hz
Tensión nominal:	3 x 380-415V
Intensidad nominal:	11 A
Intensidad de arranque:	1080-1180 %





Empresa: Sulzer
Creado Por: Christian Garcia Agreda
Teléfono: 72100692

Datos: 06/10/2021

Descripción	Valor
Cos phi - factor de potencia:	0.87-0.82
Velocidad nominal:	2920-2940 rpm
Eficiencia:	IE3 89,2%
Eficiencia del motor a carga total:	89.2 %
Eficiencia del motor a una carga de 3/4:	90.0 %
Eficiencia del motor a una carga de 1/2:	89.6 %
Número de polos:	2
Grado de protección (IEC 34-5):	55 Dust/Jetting
Clase de aislamiento (IEC 85):	F
Protección de motor integrada:	PTC
Motor N.º:	85U17417
Paneles control:	
Convertidor de frecuencia:	NONE
Otros:	
Índice de eficiencia mínima, IE min:	0.70
Peso neto:	91 kg
Peso bruto:	113 kg
Volumen de transporte:	0.285 m³
VVS danés n.º:	385904060
País de origen:	HU
Tarifa personalizada n.º:	84137075

Anexo 2: Registro fotográfico



FIGURA 1: BOMBA SR-P-1313 A



FIGURA 2: BOMBA SR-P-1313 B



FIGURA 3: DISPOSICIÓN DE TRANSDUCTORES PARA BOMBAS SR-P-1313 A/B

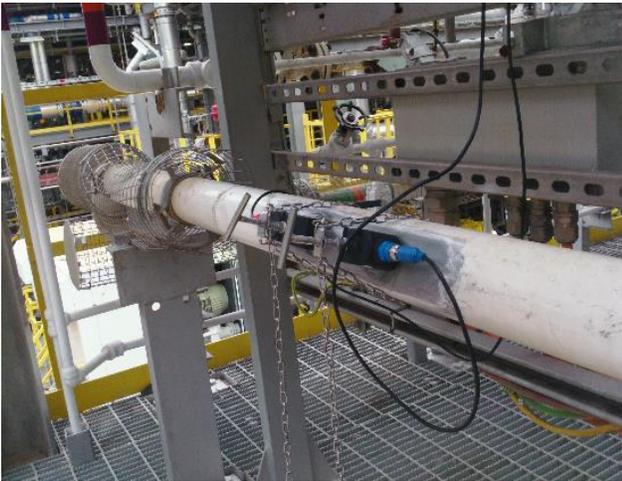


FIGURA 4: DISPOSICIÓN DE TRANSDUCTORES Y MEDICIÓN DE ESPESOR PARA MEDICIÓN DE CAUDAL DE BOMBA SR-P-1312



FIGURA 5: BOMBA GA-P-313 A Y DISPOSICIÓN DE TRANSDUCTORES PARA MEDICIÓN DE CAUDAL DE LA MISMA



FIGURA 1: BOMBA SW-P-1415 A Y DISPOSICIÓN DE TRANSDUCTORES PARA MEDICIÓN DE CAUDAL.



FIGURA 7: DISPOSICIÓN DE TRANSDUCTORES PARA BOMBA SW-P-1415 B



FIGURA 8: DISPOSICIÓN DE TRANSDUCTORES PARA BOMBAS SW-P-1414 A/B



FIGURA 9: BOMBA SW-P-1414 A



FIGURA 10: BOMBA SW-P-1414 B Y VÁLVULA REGULADORA CORRESPONDIENTE

Bibliografía

Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. Claudio Mataix

<https://areamecanica.wordpress.com/2011/05/25/ingenieria-mecanica-curvas-caracteristicas-de-una-bomba-centrifuga-i/>

<https://areamecanica.wordpress.com/2011/05/25/ingenieria-mecanica-curvas-caracteristicas-de-una-bomba-centrifuga-ii/>

Manual de eficiencia energética: Evaluación para sistemas de bombeo de agua
BID

<https://www.edesur.com.ar/tarifas-cuadro-tarifario/>

Impeller Optimized Design of the Centrifugal Pump: A Numerical and Experimental Investigation MDPI

https://www.lenntech.es/uploads/grundfos/96501909/Grundfos_CR-15-6-A-A-A-E-HQQE.pdf

<https://product-selection-classic.grundfos.com>

http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/bombas-centrifugas-y-volumetricas.pdf

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7066/1/CD-5245.pdf>