

ENERGY EFFICIENCY WHITE PAPER

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE BOMBEO



Abstract

El uso de bombas es vasto en la industria, el comercio, los sistemas municipales de agua, el sector agropecuario y la minería. Asimismo, el uso de bombas representa un costo energético de operación para sus usuarios. Frecuentemente existen áreas de oportunidad para reducir dicho costo y su huella de carbono asociada.

Este documento explica los fundamentos del análisis de la eficiencia energética de los sistemas de bombeo de aplicaciones industriales, incluyendo ejemplos reunidos en la práctica profesional de los especialistas de NRGY Solutions. Se cubren temas prácticos de medición en campo, instrumentos recomendados y ejemplos de sistemas analizados.

Los ejemplos plasmados en este documento, junto con sus conclusiones y recomendaciones, son resultado de la experiencia de nuestra práctica profesional. Consideramos que el análisis energético de sistemas de bombeo añade un gran valor a las auditorías energéticas y brinda de resultados que son muy difíciles o imposibles de obtener si no se conocen los fundamentos de análisis, las mediciones en campo o la combinación de ambos.

Si este tema es de interés para usted o Ud. tiene necesidad de que se realice un análisis de sus sistemas de bombeo, no dude en contactarnos en info@nrgysolutions.mx.

Abstract	2
Eficiencia energética en unidades de bombeo de agua.....	4
Unidades de bombeo	7
Importancia de la eficiencia energética.....	8
Curvas de bombas	10
Curvas de sistemas hidráulicos.....	12
Instrumentación para la evaluación en campo	15
Ecuación general de la energía y su aplicación para sistemas de bombeo.....	25
Ejemplo de evaluación de la eficiencia de una bomba de tipo turbina vertical.....	26
Ejemplo de evaluación de la eficiencia de una bomba de tipo split case.....	30
Ejemplo de evaluación de la eficiencia de una bomba de tipo sumergible para pozo profundo	33
Ejemplo de evaluación de una bomba centrífuga de aplicación general.....	38
Ejemplo de análisis de ahorros por reemplazo de una válvula de estrangulación por un VFD.....	42
Ejemplo de bomba centrífuga que opera en una región inestable.....	46
Ejemplo de evaluación del control de la operación de bombas en paralelo.....	49
Palabras finales	51

Eficiencia energética en unidades de bombeo de agua

El bombeo de agua es una actividad fundamental de los operadores de servicios de agua municipales y frecuentemente realizada por usuarios industriales. Asimismo, el bombeo de agua requiere energía para poder llevarse a cabo. En el sector industrial de EE. UU., las operaciones de bombeo representan el 25% de la energía consumida por motores eléctricos.

Debido a los factores mencionados, optimizar el uso de energía en operaciones de bombeo resulta en un gran beneficio de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, gracias a la reducción de uso de energía eléctrica, de la cual una gran proporción proviene de fuentes de combustibles fósiles. Adicionalmente, la optimización de los sistemas de bombeo de agua resulta en ahorro económico y reducción de costos de las operaciones de bombeo tanto en operadores de servicios de agua municipales como en usuarios industriales y comerciales.

La optimización de los sistemas de bombeo requiere de una evaluación de sus condiciones actuales de operación. Esta evaluación requiere de mediciones en campo y de análisis de los datos recogidos en campo.

Este documento establece una metodología de recolección de datos y su análisis para determinar el estado operativo de los sistemas de bombeo desde el punto de vista energético. Sin embargo, cabe mencionar que el análisis de las bombas puede incluir aspectos de diseño y operativos no energéticos, no considerados en este documento.

Sistemas de bombeo típicos

Los sistemas de bombeo pueden ser clasificados en dos tipos:

1. Sistemas con columna hidrostática (abiertos)
2. Sistemas sin columna hidrostática (cerrados)

Los sistemas de bombeo encontrados en campo entran en alguna de estas categorías.

Un ejemplo de un sistema abierto es el bombeo de agua entre tanques que están a diferentes alturas con respecto a un nivel de referencia. La diferencia de alturas puede ser expresada como la diferencia entre la altura z_2 y z_1 . Este tipo de sistemas es común en sistemas de distribución de agua municipales.

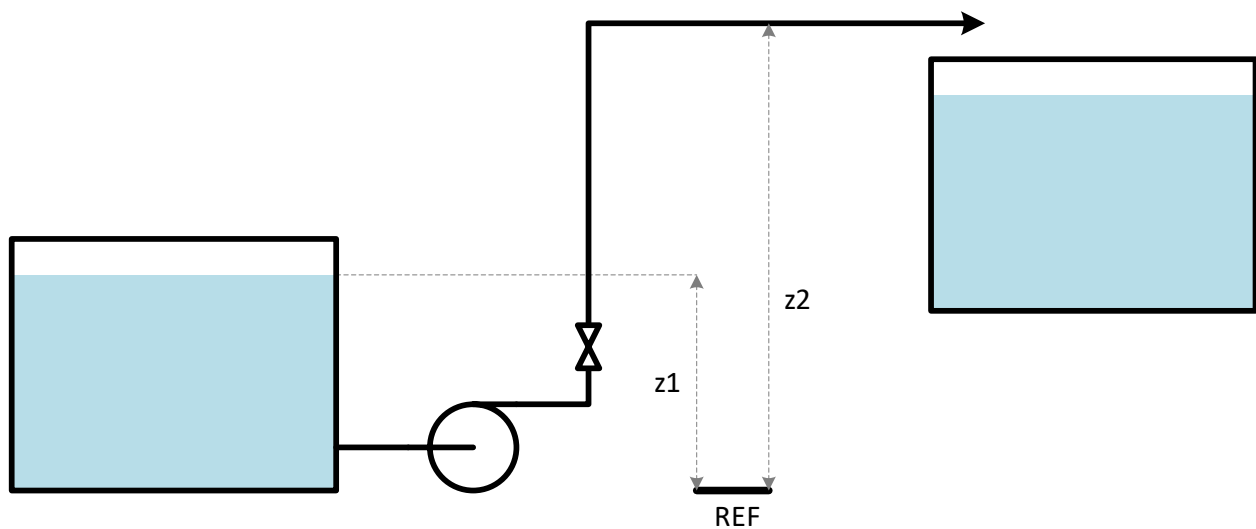


Figura 1. Sistema de bombeo abierto.

Un ejemplo de un sistema de bombeo cerrado es el bombeo de agua en donde la tubería de retorno al tanque está por debajo del nivel de agua del mismo tanque del cual la bomba succiona. Este tipo de sistemas no tiene que vencer una columna hidrostática, solamente en el arranque si la tubería del sistema está vacía.

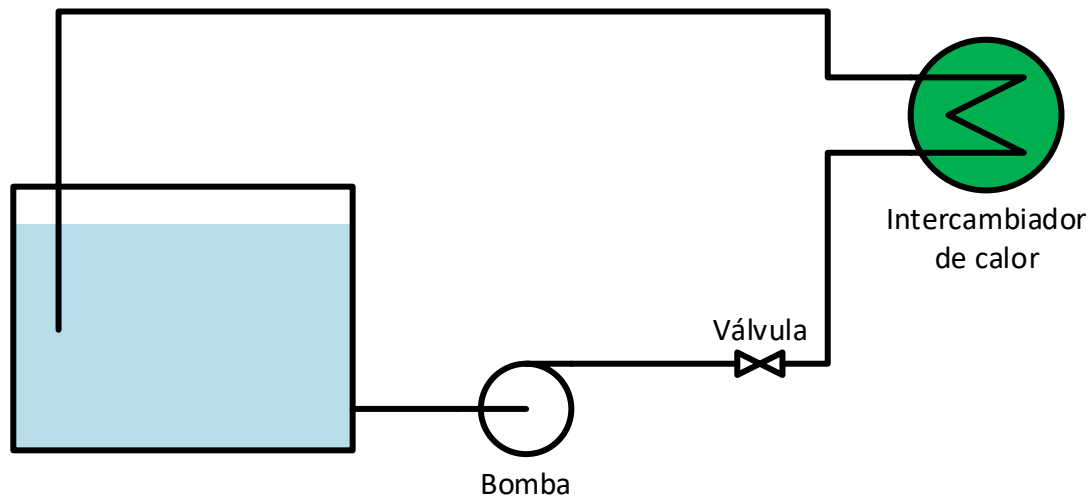


Figura 2. Sistema de bombeo cerrado.

Otro ejemplo de sistema de bombeo de agua industrial se muestra en la Figura 3, mostrando un sistema de agua de enfriamiento de cierto proceso productivo. Este sistema representa al circuito de agua de enfriamiento de un chiller enfriado por agua. La columna hidrostática es la diferencia de altura entre la tubería de caída del agua y el depósito de agua en la torre de enfriamiento.

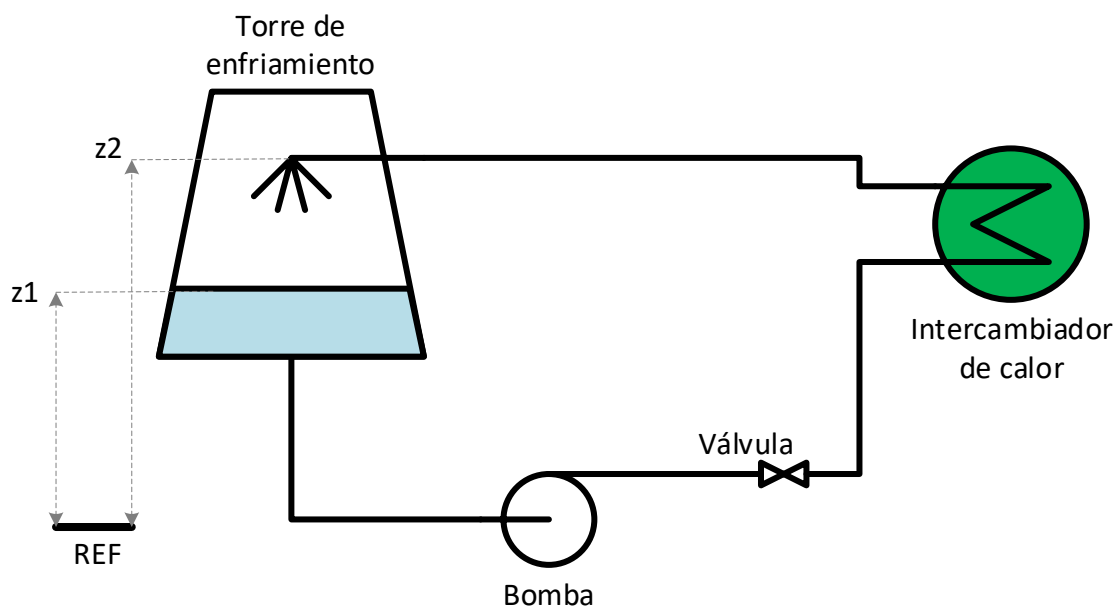


Figura 3. Ejemplo de sistema de bombeo industrial.

Unidades de bombeo

En la mayoría de las aplicaciones, las bombas son impulsadas por motores eléctricos. Un sistema típico de unidad motor-bomba se muestra a continuación. La Figura 4 muestra una unidad de bombeo compuesta por un alimentador eléctrico, y un motor eléctrico acoplado mecánicamente a una bomba.

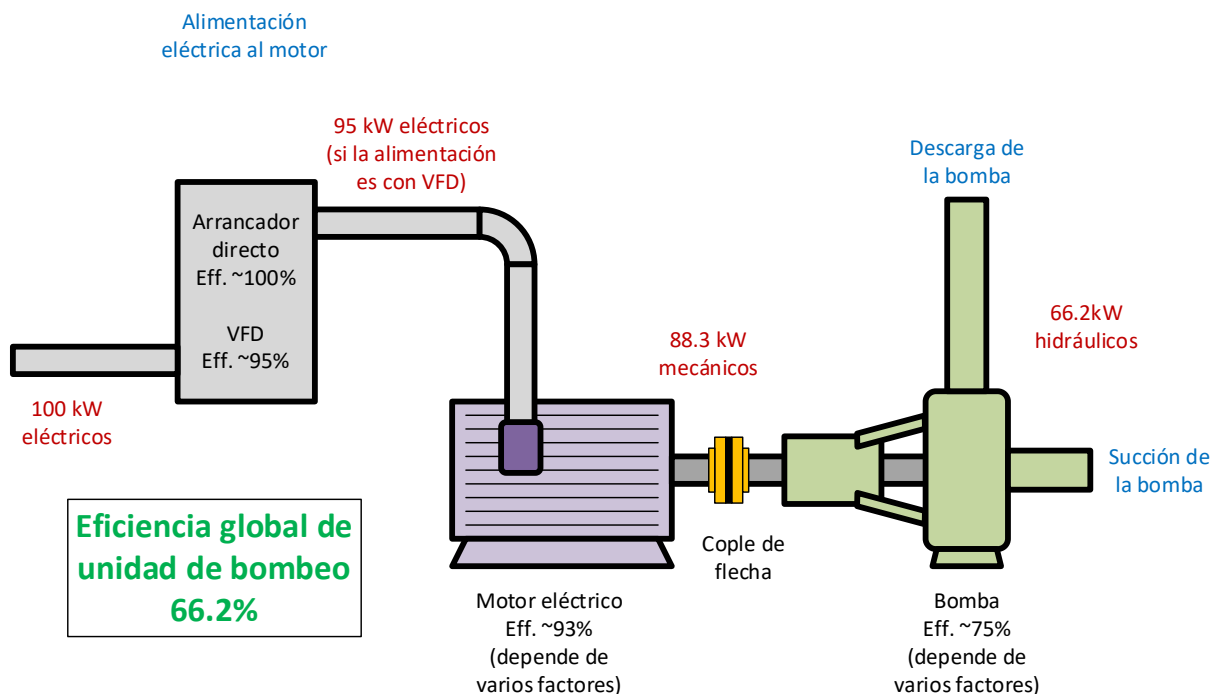


Figura 4. Diagrama de una unidad motor-bomba.

Todos los componentes de la unidad de bombeo tienen una eficiencia energética asociada a ellos. Refiriéndonos a la Figura 4, el variador de frecuencia variable (VFD por sus siglas en inglés) en el alimentador eléctrico tiene una eficiencia de 95% en la conversión de potencia eléctrica a potencia eléctrica, el motor eléctrico tiene una eficiencia de 93% en la conversión de potencia eléctrica a potencia mecánica, y la bomba opera con eficiencia de 75% en la conversión de potencia mecánica a potencia hidráulica. La multiplicación de la eficiencia de cada uno de estos componentes resulta en la eficiencia de conversión de energía de la unidad de bombeo de 66.2%. Esto significa que a la unidad de bombeo ingresan 100kW eléctricos y solamente se logran 66.2kW hidráulicos. La diferencia de 33.8kW es la potencia perdida como calor hacia el medio ambiente.

Importancia de la eficiencia energética

La potencia perdida hacia el medio ambiente en el ejemplo anterior, multiplicada por las horas de operación de la unidad de bombeo, resulta en los kWh de energía perdidos hacia el medio ambiente y que es prácticamente imposible volver a aprovechar útilmente. El usuario de la bomba paga por esta energía perdida y, además, si la energía eléctrica fue generada en una central eléctrica que quema un combustible fósil, las pérdidas de la unidad de bombeo serán responsables de emisiones de gases de efecto invernadero emitidas hacia la atmósfera en la central eléctrica.

Por los dos aspectos mencionados, el usuario está interesado en mejorar la eficiencia energética de su sistema de bombeo para:

- a) Reducir su costo de operación
- b) Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a su operación

Las fórmulas para obtener el ahorro económico y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por la mejora de la eficiencia de la unidad de bombeo se muestran a continuación:

$$\text{Ahorro económico, } \frac{\$}{\text{año}} = kW_h \times \frac{\text{horas}}{\text{año}} \times \text{precio energía, } \frac{\$}{kWh_e} \times \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right)$$

$$\text{Reducción emisiones, } \frac{kgCO_{2eq}}{\text{año}} = kW_h \times \frac{\text{horas}}{\text{año}} \times \text{factor emisiones, } kgCO_{2eq}/kWh_e \times \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right)$$

En donde,

kW_h es la potencia hidráulica que entrega la bomba al agua

kWh_e es unidad de energía eléctrica

$kgCO_{2eq}/kWh_e$ es el factor de emisiones eléctrico compartido por el suministrador eléctrico

η_1 es la eficiencia global original del sistema de bombeo expresada en por unidad (antes de la mejora de eficiencia)

η_2 es la eficiencia global nueva del sistema de bombeo expresada en por unidad (posterior a las mejoras de eficiencia)

Una lista no limitativa de modificaciones que pueden hacerse en un sistema de bombeo para mejorar su eficiencia energética y medidas de conservación de energía se muestra a continuación.

1. Reemplazo de un motor eléctrico por unidad de mayor eficiencia.
2. Reemplazo de una bomba que opera con eficiencia pobre a causa de haber sido seleccionada erróneamente.
3. Reemplazo de una bomba que opera con eficiencia pobre a causa de antigüedad y/o deterioro por su uso.
4. Reemplazo de válvula de estrangulación o recirculación por un VFD para control de caudal.
5. No operar el sistema de bombeo si no se requiere.

6. Elegir la cantidad óptima de bombas en paralelo encendidas.
7. Operar un sistema de bombeo a menor caudal si el proceso así lo permite.

Curvas de bombas

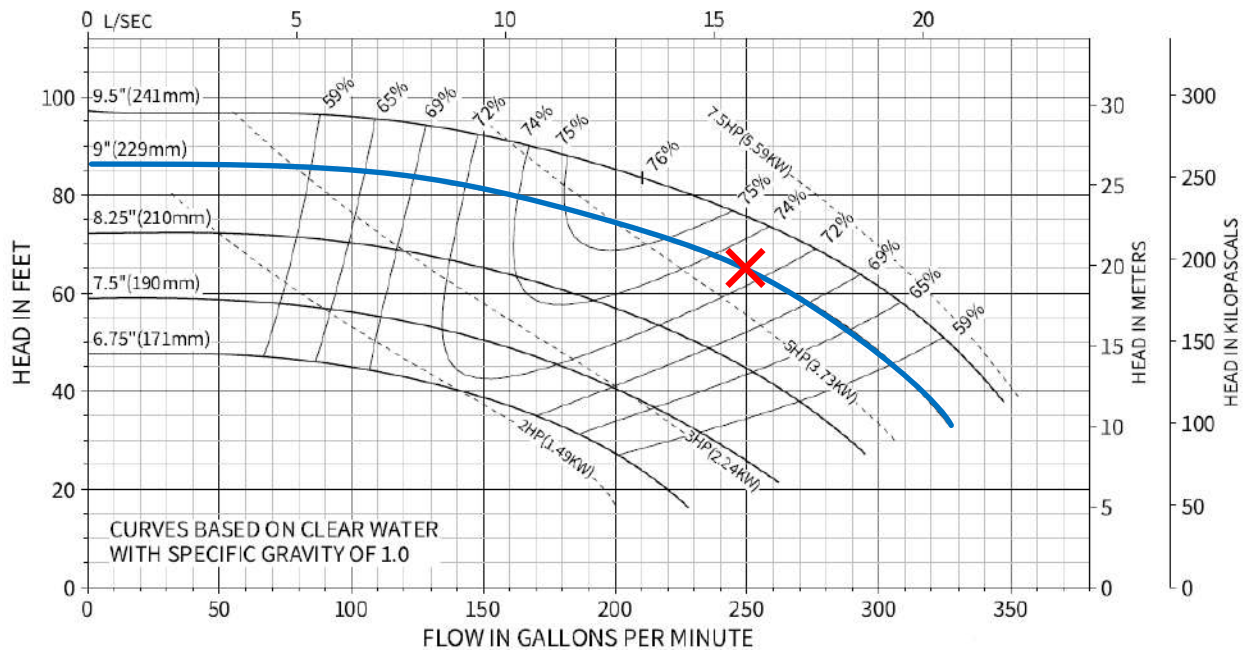
Al seleccionar una bomba para cierta aplicación, el o la analista deberá de consultar documentos de curvas de bombas de diversos fabricantes. En las curvas de las bombas se despliegan parámetros relevantes para la selección de la bomba. Se muestra un ejemplo de una curva de bomba, correspondiente a una bomba marca TACO modelo 2009D a 1760 RPM.

Los parámetros que se reportan en las curvas de bombas son (refiérase a la Figura 5):

- Caudal o flujo volumétrico en el eje horizontal.
- Columna desarrollada por la bomba en el eje vertical. La columna de la bomba es el trabajo específico que desarrolla la bomba, dividido por la aceleración de la gravedad (por simplicidad el autor recomienda utilizar unidades SI).

$$h_{pump, m} = \frac{w_{pump}, \frac{J}{kg}}{g, \frac{m}{s^2}}$$

- Curvas de varios diámetros de impulsor para el mismo modelo de bomba que relacionan el caudal con la columna. La forma de la curva depende del diseño del impulsor y la bomba.
- Isolíneas de eficiencia de conversión de la bomba.
- Líneas de potencia nominal de motor eléctrico requerida.



Tomando como referencia la Figura 5, supongamos que analizamos una bomba cuyo impulsor tiene un diámetro de 9" (curva azul) y que la bomba opera en el punto indicado por la cruz roja. Los parámetros que podemos determinar son:

- Caudal: 15.7 litros por segundo

- b. Columna: 20 metros
- c. Eficiencia de la bomba: 73%
- d. La bomba está impulsada por un motor de 7.5HP nominales.

Adicionalmente, se puede calcular la potencia hidráulica que la bomba le imparte al agua y se puede determinar la potencia mecánica de entrada a la bomba:

$$\dot{W}_{pump} = h_{pump} \cdot g \cdot \dot{m}$$

$$\dot{W}_{mec} = \frac{\dot{W}_{pump}}{\eta_{pump}}$$

En donde,

$\dot{W}_{pump}$ es la potencia hidráulica que desarrolla la bomba

$\dot{W}_{mec}$ es la potencia mecánica de entrada a la bomba

η_{pump} es la eficiencia de la bomba (indicada en la curva de la bomba)

$\dot{m}$ es el flujo másico de agua que impulsa la bomba y está dado por $\rho \cdot \dot{V}$

En donde,

ρ es la densidad del agua, que por practicidad tomaremos como 1000 kg/m³ o 1 kg/litro.

$\dot{V}$ es el flujo volumétrico que impulsa la bomba.

De manera tal que la potencia hidráulica que desarrolla la bomba de la Figura 5 es:

$$\dot{W}_{pump} = 20m \cdot 9.8 \frac{m}{s^2} \cdot 1 \frac{kg}{l} \cdot 15.7 \frac{l}{s} \cdot \frac{1k}{1000} = 3.08kW_h$$

Y la potencia mecánica de entrada a la bomba en dicho punto de operación es:

$$\dot{W}_{mec} = \frac{3.08 kW_h}{0.73} = 4.22kW_{mec}$$

Para el análisis y selección de bombas se recomienda entender los parámetros indicados en las curvas de las bombas y las relaciones entre dichos parámetros. En la Figura 5, el punto de operación de la bomba, indicado por la cruz roja, indica la intersección de la curva de la bomba de impulsor de 9" con la curva del sistema que discutiremos a continuación.

Curvas de sistemas hidráulicos

Los sistemas hidráulicos son el conjunto de tuberías, accesorios, válvulas y equipos como intercambiadores de calor, tanques y torres de enfriamiento por donde fluye el caudal impulsado por la bomba. Al fluir el caudal por dichos elementos del sistema, hay una caída de presión provocada por la fricción de este, que puede ser expresada en términos de columna. La curva del sistema indica la columna o caída de presión en el sistema en función del caudal.

La Figura 6 muestra un ejemplo de un sistema de bombeo industrial y el diagrama que indica el flujo que impulsa la bomba en dicho sistema hidráulico. El punto de operación es la intersección de la curva de la bomba (color azul) y la curva del sistema (color rojo).

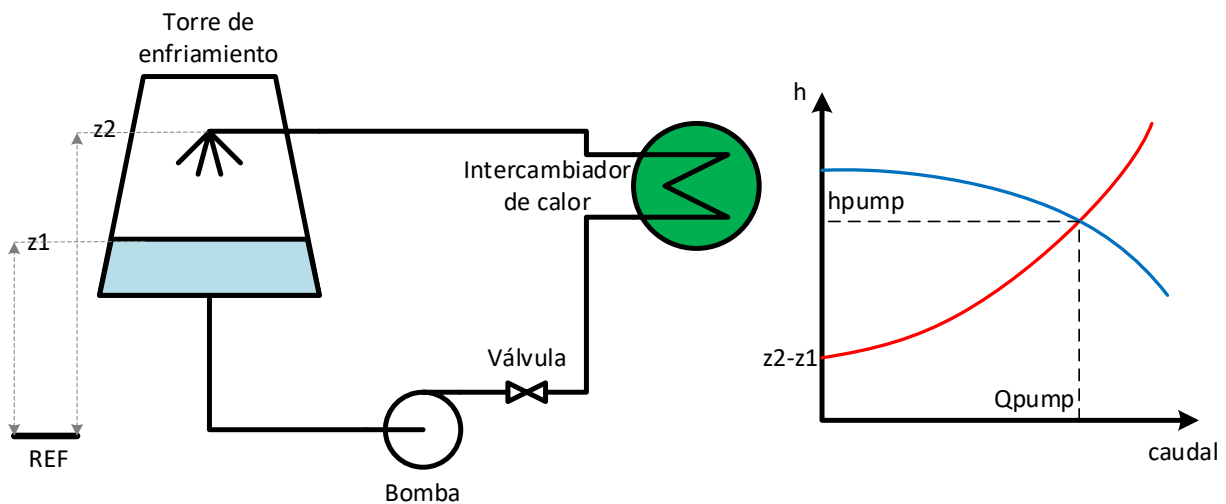


Figura 6. Sistema de bombeo industrial y curva de bomba (azul) y sistema (rojo).

La relación entre la columna del sistema hidráulico en función del caudal de agua que fluye a través de este. Esta relación puede ser aproximada por una función cuadrática de la siguiente forma.

$$h_s(\dot{Q}) = h_0 + \alpha \cdot \dot{Q}^2$$

En donde,

h_s es la columna del sistema en función del caudal

h_0 es la columna hidrostática presente en sistemas hidráulicos abiertos como aquel de la Figura 1 o Figura 6 y es igual a $z_2 - z_1$.

α es un coeficiente cuyo propósito es ajustar la curva del sistema a las mediciones hechas en campo.

$\dot{Q}$ es el caudal o flujo volumétrico en el sistema hidráulico. En este documento usamos indistintamente $\dot{Q}$ y $\dot{V}$.

Supongamos que en un sitio industrial tenemos el objetivo de obtener la curva de un sistema hidráulico similar al mostrado en la Figura 6 y la bomba indicada en la Figura 5. Para lograr dicho objetivo debemos de hacer mediciones de caudal en la bomba y la columna desarrollada por la bomba.

Adicionalmente, medimos la altura de la entrada de agua a la torre de enfriamiento y el espejo de agua de su tanque.

Las mediciones resultan en:

- Caudal: 15.7 litros por segundo
- Columna desarrollada por la bomba: 20 metros
- $h_0 = z_2 - z_1 = 2.5m$

Para obtener la ecuación de la curva de nuestro sistema, debemos despejar el coeficiente α de la fórmula de la curva del sistema.

$$\alpha = \frac{h_s - h_0}{\dot{Q}^2} = \frac{20m - 2.5m}{\left(15.7 \frac{l}{s}\right)^2} = 0.071 \frac{m \cdot s^2}{l^2}$$

De manera tal que la curva de nuestro sistema hidráulico es:

$$h_s, m = 2.5m + 0.071 \frac{m \cdot s^2}{l^2} \cdot \left(\dot{Q}, \frac{l}{s}\right)^2$$

La Figura 7 muestra la curva del sistema definida por la fórmula anterior sobrepuesta en la curva de la bomba.

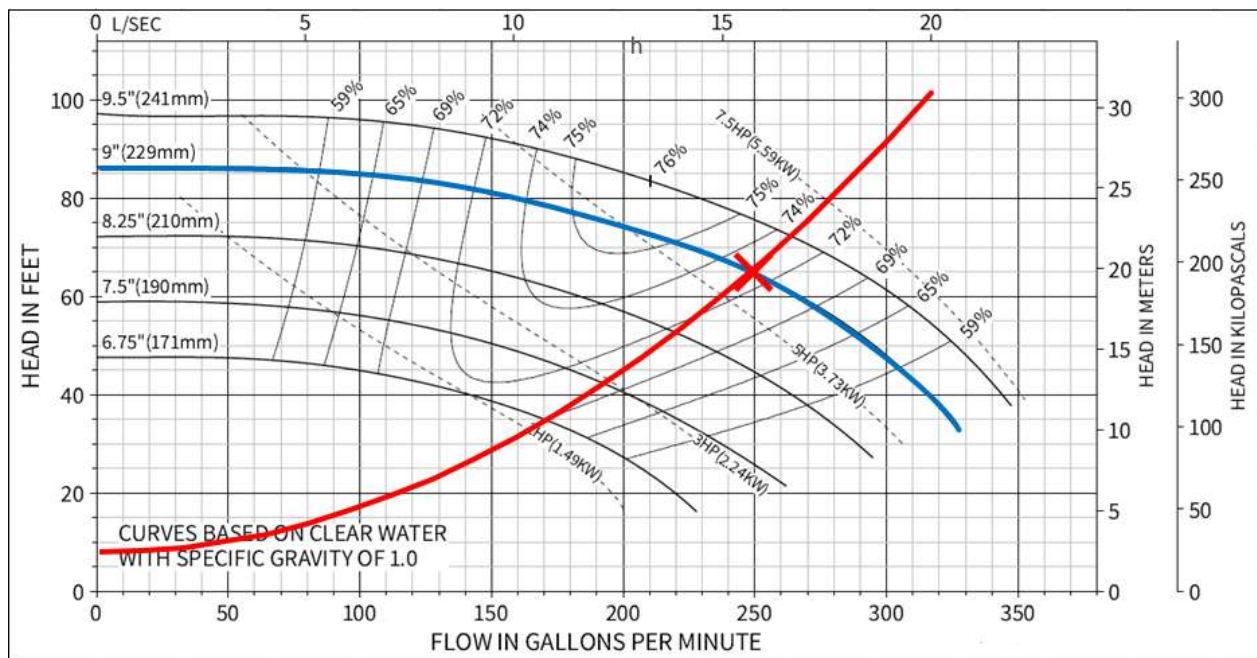


Figura 7. Curva del sistema (color rojo) sobrepuesta en la curva de la bomba. Tomada de TACO.

La curva del sistema hidráulico puede ser constante o bien, puede cambiar en el tiempo. Algunos factores que pueden causar que la curva cambie con el tiempo, son:

- Cierre parcial de la válvula de control de caudal (afecta al coeficiente α)

- Taponamiento de tuberías o del interior del intercambiador de calor (afecta al coeficiente α)
- Cambio de nivel en el tanque de la torre de enfriamiento (afecta a h_0)
- Arranque del sistema de bombeo con tuberías vacías (afecta a h_0)

Obtener la fórmula de la curva de un sistema hidráulico en campo es una tarea sencilla si se cuenta con los valores medidos de los parámetros necesarios para calcularla. La curva del sistema hidráulico es una herramienta de evaluación del estado de operación del sistema de bombeo y puede aportar información valiosa para la toma de decisiones en las estrategias de mejora de uso eficiente de energía.

Instrumentación para la evaluación en campo

La evaluación del desempeño energético de sistemas de bombeo requiere de la ejecución de mediciones de parámetros físicos en campo y del análisis de dichas mediciones para obtener información para la toma de decisiones.

El ejercicio de la toma de mediciones en campo exige tomar en cuenta ciertas consideraciones. Esta es una lista no limitativa de dichas consideraciones.

- ¿Qué parámetros debo de medir?
- ¿Qué instrumentos de medición debo utilizar?
- ¿Poseo las competencias de seguridad ocupacional adecuadas para ejecutar la medición?
- ¿Por cuánto tiempo debo de realizar las mediciones?
- ¿A qué restricciones u obstáculos puedo enfrentarme durante la medición?
- ¿De qué manera preparo los instrumentos de medición para soportar posibles fugas de agua y exposición a elementos naturales?

Para realizar un análisis de la eficiencia de unidades de bombeo, se requieren tres mediciones.

- Caudal de agua impulsado por la bomba
- Presión a la succión y a la descarga de la bomba
- Potencia eléctrica de entrada al motor eléctrico

La Figura 8 muestra de manera general, la infraestructura de medición de parámetros de bombeo necesarios para llevar a cabo el análisis.

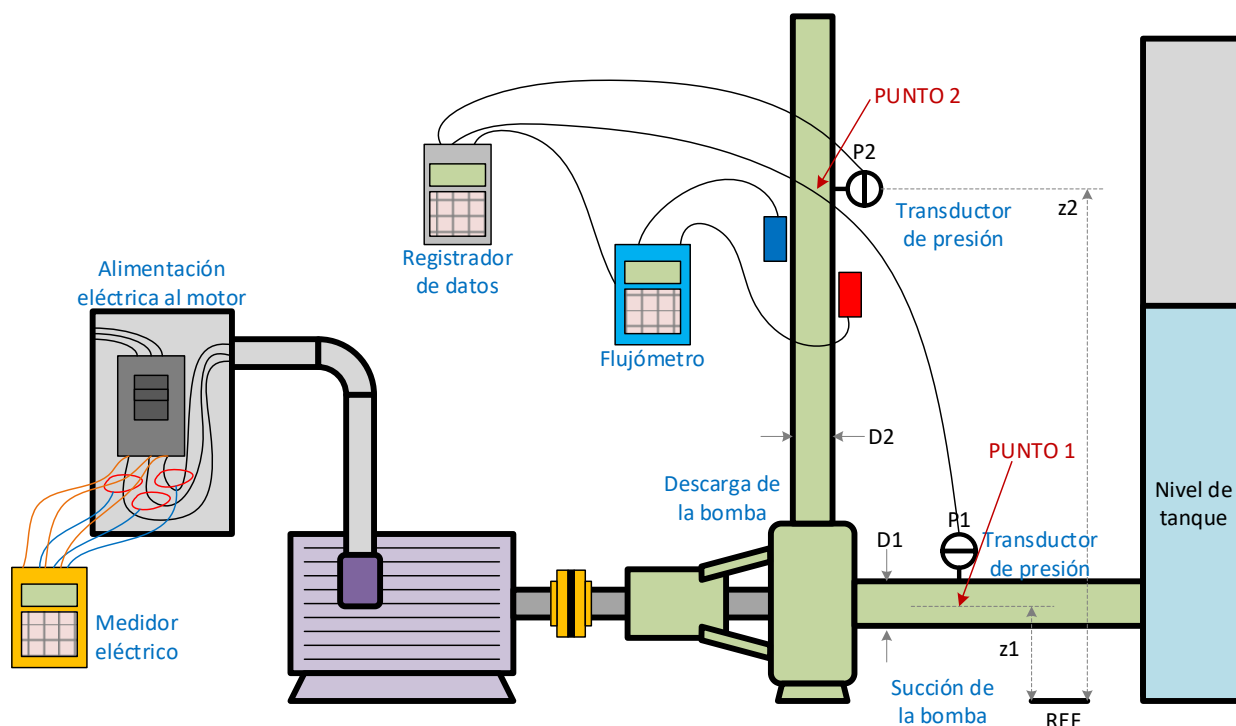


Figura 8. Esquema general de medición de parámetros relevantes en sitio.

Medición no intrusiva de caudal con ultrasonido

La medición de caudal puede realizarse con un medidor de ultrasonido de tecnología *time-transit*. Este instrumento de medición permite lograr mediciones confiables de caudal sin realizar orificios en la tubería y sin causar paros o libranzas en el sistema de bombeo, siempre y cuando ciertas condiciones de la tubería y experiencia del instalador se cumplan.

Aspectos para considerar durante la medición de caudal:

- i. El instrumento se coloca en un tramo de tubería recto, alejado de codos, válvulas o cambios abruptos de diámetro. Esta condición no siempre se cumple. El instalador debe de tener habilidad para encontrar el punto de medición más adecuado. La medición de caudal puede ser alejada de la bomba, siempre y cuando se asegure que no hay salidas o entradas de agua entre la bomba y el punto de medición o viceversa.
- ii. La vibración mecánica excesiva puede causar problemas con la medición de flujo con ultrasonido. Evite posicionar las sondas en tuberías que vibran excesivamente.
- iii. Las sondas del instrumento se colocan en una superficie libre de pintura. Se puede tallar la pintura con una carda impulsada por un taladro. Esta actividad puede generar chispa y es posible que se tenga que tramitar un permiso de trabajo en caliente.
- iv. Las sondas del instrumento se colocan de manera tal para minimizar el riesgo de que se coloquen en zonas donde pueda haber burbujas de aire dentro de la tubería.
- v. Se coloca un gel conductor de ultrasonido entre las sondas y la tubería. El gel debe de soportar exposición a posible lluvia, radiación solar, polvo y suciedad. Se recomienda Dow Corning Molykote 111.
- vi. Se mide el grosor de la tubería con un medidor de grosor ultrasónico. Usar aceite vegetal o gel conductor para realizar esta medición.
- vii. Se recomienda utilizar un instrumento de medición que tenga capacidad de grabar registros en un periodo de tiempo, o bien, que tenga capacidad de comunicación para comunicar mediciones instantáneas a un registrador de datos externo.

Herramienta recomendada para la medición de caudal con instrumento de ultrasonido:

Tabla 1. Herramienta recomendada para medición de caudal.

Medidor de ultrasonido con los siguientes accesorios: a) Cable de alimentación b) Par de sondas adecuadas para el diámetro de tubería que se medirá c) Cadenas para sujetar las sondas d) Cables de las señales de las sondas	Gel o pasta conductora Dow Corning Molykote 111 Nota: el gel conductor de uso médico sí sirve para esta aplicación, sin embargo, rápidamente se seca si está expuesto al sol o a altas temperaturas.
Medidor de grosor de ultrasonido	Extensión eléctrica
Taladro eléctrico con carda	Trapos de limpieza
Cinta métrica de costurero	Flexómetro



Figura 9. Limpieza de pintura de la tubería con una carda.



Figura 10. Medición del grosor de la tubería con medidor de grosor por ultrasonido.



Figura 11. Configuración de medidor de caudal con ultrasonido.

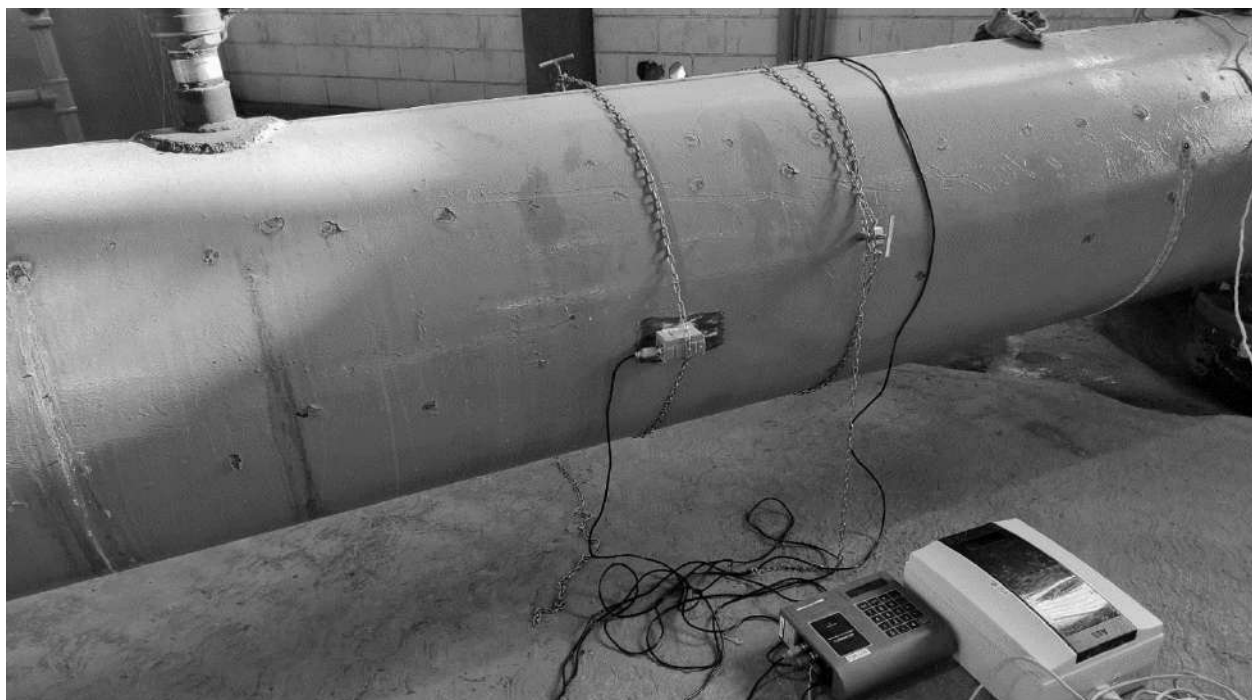


Figura 12. Medición de caudal con ultrasonido.



Figura 13. Medición instantánea de caudal de agua en una tubería.

Medición de presión a la descarga y a la succión de la bomba

La diferencia de presión entre la descarga y la succión de la bomba son parámetros que se deben de medir o determinar durante el análisis de desempeño energético de una unidad de bombeo.

Con el objetivo de registrar en un periodo de tiempo los valores de presión manométrica de la bomba, hemos optado por utilizar transductores de presión manométrica con salida analógica de 4 a 20 mA. Recomendamos elegir transductores de presión manométrica de 20 bares nominales. Estos instrumentos tienen una gran precisión, incluso cuando miden presiones mucho menores de su valor nominal, sin embargo, difícilmente, en bombas de agua de uso general, se superarán presiones de descarga de 20 bares. Anticipe los rangos de medición de sus instrumentos para la medición para evitar contratiempos.

Aspectos para considerar durante la medición de presión:

- i. Anticipe llevar accesorios como niples, reductores y válvulas manuales.
- ii. Si va a cerrar válvulas para conectar sus instrumentos, asegúrese de no perturbar la instrumentación actual de la bomba, podría disparar una protección por baja presión y apagar la bomba.
- iii. En la gran mayoría de las instalaciones de bombas, existen tomas que se pueden utilizar para conectar el transductor de presión manométrica a la descarga de la bomba, sin embargo, frecuentemente, no hay tomas disponibles en la succión de la bomba. En este caso, investigue si la bomba succiona agua de un tanque cuyo nivel se mantiene estático. Tome nota del valor del nivel del tanque.
- iv. Deberá de conectar sus medidores de presión manométrica a un registrador de datos con capacidad de recibir y configurar señales de 4-20mA.

Herramienta recomendada para la medición de presión con transductores de presión manométrica:

Tabla 2. Herramienta recomendada para medición de presión.

Par de transductores de presión manométrica con salida 4-20mA	Llave inglesa
Llave stilson	Cinta de teflón
Variedad de accesorios de tubería para varios tamaños estándar	Flexómetro



Figura 14. Transductores de presión manométrica en descarga y succión de una bomba.



Figura 15. Medición de presión en el cabezal principal de descarga de varias bombas en paralelo.

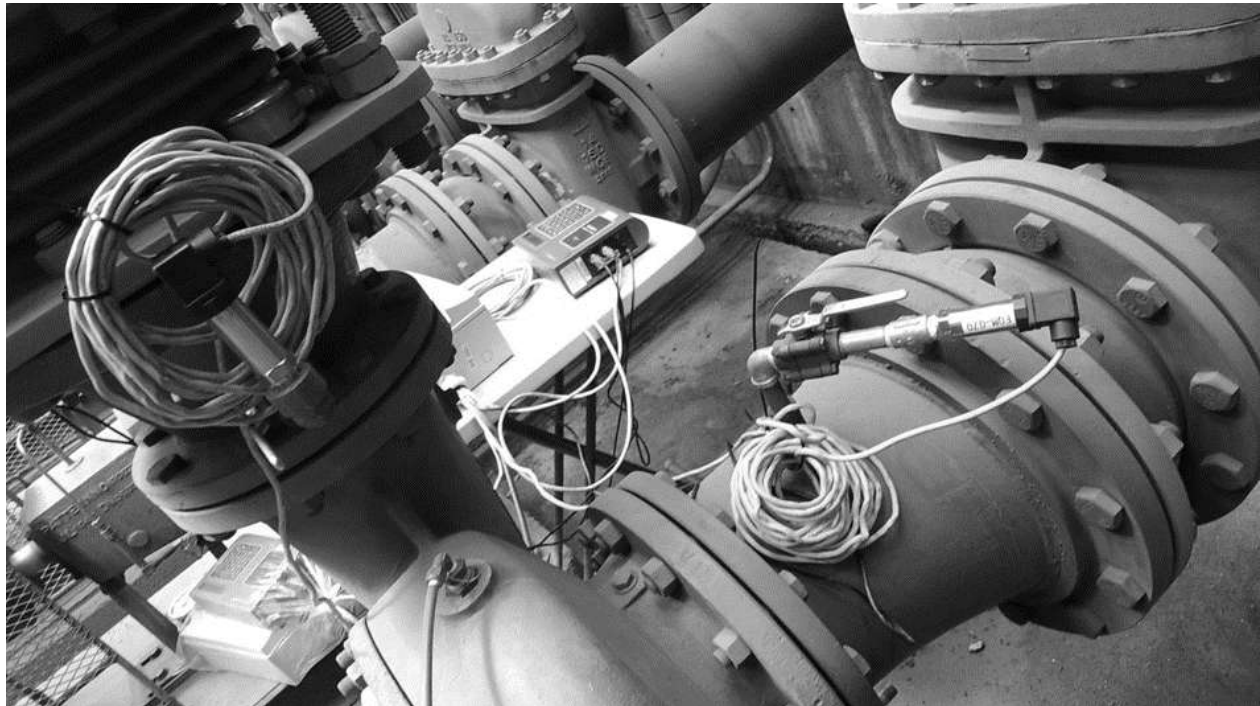


Figura 16. Medición de presión y caudal de una bomba.

Medición de potencia eléctrica en la entrada del motor y evaluación de la eficiencia del motor

La medición eléctrica en el tablero de alimentación eléctrica del motor es fundamental para la evaluación de la eficiencia de la unidad de bombeo. Una vez teniendo el valor de la potencia eléctrica de entrada a la unidad de bombeo y el valor de la potencia hidráulica de salida, es posible realizar el cálculo de la eficiencia global de la unidad de bombeo. La eficiencia global de la unidad de bombeo es, en sí misma, el producto de la eficiencia del motor y la eficiencia de la bomba.

$$\eta_{global} = \eta_{motor} \cdot \eta_{pump} = \frac{\dot{W}_{pump}}{\dot{E}_{in}}$$

En donde,

η_{global} es la eficiencia global de la unidad de bombeo (motor y bomba)

η_{motor} es la eficiencia de conversión de energía del motor eléctrico

η_{pump} es la eficiencia de conversión de energía de la bomba

$\dot{W}_{pump}$ es la potencia hidráulica que entrega la bomba al agua

$\dot{E}_{in}$ es la potencia eléctrica de entrada al motor

Si hubiera un convertidor electrónico (VFD) alimentando eléctricamente al motor, se podría añadir la eficiencia del convertidor electrónico que alimenta eléctricamente al motor, sin embargo, esto no siempre es el caso.

Un parámetro de interés en la ecuación anterior es el valor de la eficiencia del motor eléctrico. Este parámetro es prácticamente imposible de evaluar en campo. Para conseguirlo, se recomiendan dos alternativas:

1. Utilizar el valor de la eficiencia de placa del motor eléctrico, en cuyo caso, tomar en consideración los dos incisos siguientes:
 - a. Determinar el factor de carga del motor. Si el factor de carga es igual o superior de 33%, la eficiencia del motor es constante y equivalente al valor de placa, en términos prácticos.
 - b. Determinar cuántas veces ha sido reparado el motor de sus devanados en su interior. Una regla de dedo sugiere que, por cada reparación, se debe de restar un 1% en su valor de eficiencia nominal.
2. Evaluar la eficiencia del motor con un analizador eléctrico que tenga una función de “Motor Analyzer” tal como el FLUKE 438. Este instrumento es capaz de estimar el valor real de la eficiencia del motor eléctrico gracias a un análisis interno de mediciones de voltaje y corriente de alimentación al motor.

Herramienta recomendada para la medición de caudal con instrumento de ultrasonido:

Tabla 3. Herramienta recomendada para medición de potencia eléctrica.

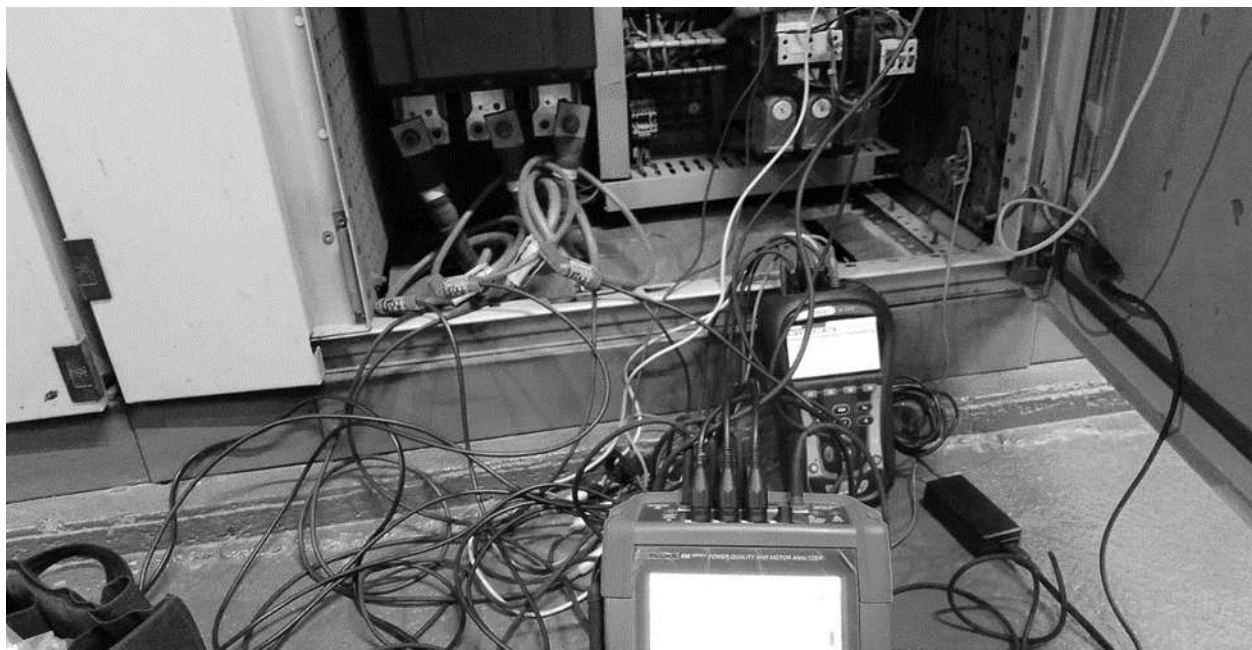
a) Medidor eléctrico trifásico o analizador de calidad de la energía trifásico (Se recomienda el FLUKE 438 con función “Motor Analyzer”)	EPP para trabajo eléctrico i. Zapato dieléctrico j. Casco clase E k. Ropa de algodón l. Traje de arco eléctrico m. Guantes dieléctricos para trabajo en baja tensión
Maletín de herramienta dieléctrica	Extensión eléctrica



Figura 17. Pantalla de la función de Motor Analyzer del FLUKE 438.



Figura 18. Auditora de energía realizando medición eléctrica de una unidad de bombeo con un medidor eléctrico trifásico DENT ELITE PRO XC.



*Figura 19. Instalación de medidores eléctricos en alimentador eléctrico del motor de bomba.
FLUKE 438 y METREL MI2892.*

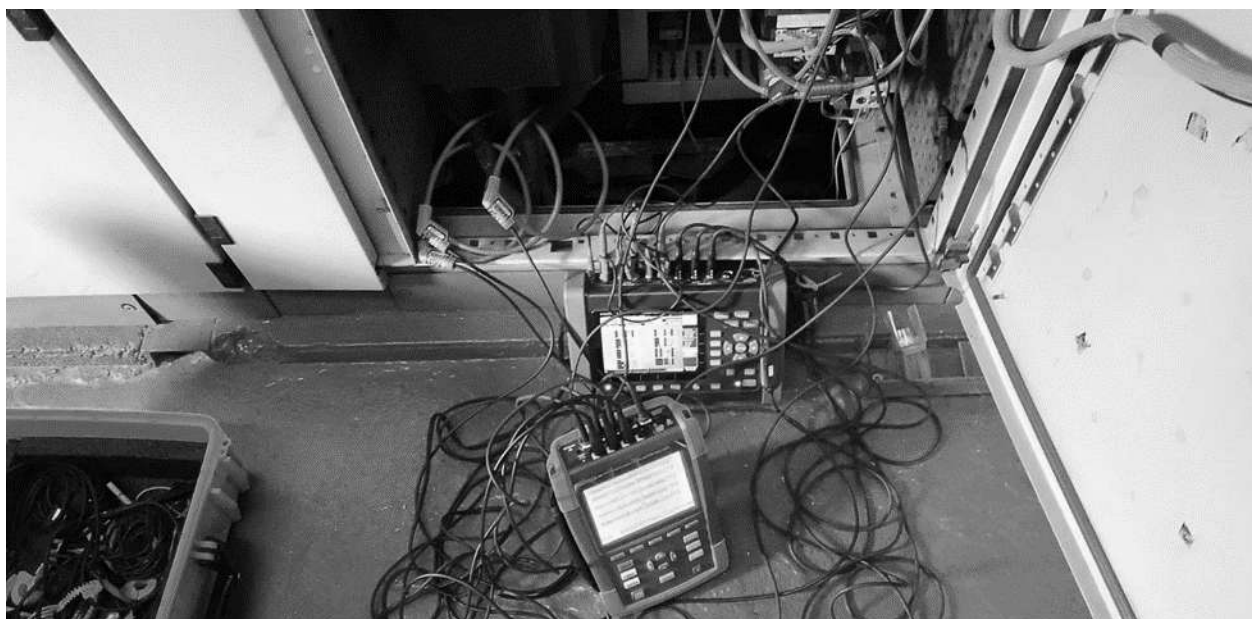


Figura 20. Analizadores eléctricos FLUKE 438 y HIOKI PQ3198 en la alimentación eléctrica de un motor.

Ecuación general de la energía y su aplicación para sistemas de bombeo

La evaluación de la eficiencia de conversión de energía de las bombas hidráulicas requiere del análisis de los valores obtenidos durante las mediciones en campo.

La eficiencia de conversión de energía de la bomba hidráulica, que frecuentemente es el parámetro objetivo del análisis, se calcula por la siguiente ecuación.

$$\eta_{pump} = \frac{\dot{W}_{pump}}{\dot{E}_{in} \cdot \eta_{motor}}$$

Los parámetros incluidos en el lado derecho de la ecuación anterior son los que deben de ser obtenidos a partir de mediciones en campo. Revisaremos cada uno de ellos.

La potencia hidráulica se calcula

$$\dot{W}_{pump} = w_{pump} \cdot \dot{m} = h_{pump} \cdot g \cdot \rho \cdot \dot{V}$$

En donde,

ρ es la densidad del agua (por facilidad, se recomienda considerar 1000 kg/m³)

El análisis requiere conocer y entender los términos de la ecuación general de la energía en sistemas abiertos, aplicada para sistemas de bombeo. La ecuación, expresada en términos de trabajo específico desarrollado por la bomba y el cambio de energía específica del sistema, indicada a continuación, debe de ser evaluada eligiendo estratégicamente en la etapa de medición en sitio, los puntos referentes a los subíndices 1 (succión) y 2 (descarga). Referirse a la Figura 8.

$$w_{pump} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{\alpha}{2} (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2) + g(z_2 - z_1) + e_{loss}$$

En donde,

w_{pump} es el trabajo específico desarrollado por la bomba

$\frac{P_2 - P_1}{\rho}$ es el cambio de energía específica de fluido (*flow energy*), que es calculada con la diferencia de la presión de la descarga (punto 2) y la succión de la bomba (punto 1)

$\frac{\alpha}{2} (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2)$ es el cambio de energía cinética específica, dependiente del cambio de velocidad del agua en la tubería en la descarga (punto 2) y la succión de la bomba (punto 1)

α es un coeficiente con valor numérico de 1.05

$g(z_2 - z_1)$ es el cambio de energía potencial específica, dependiente del cambio de altura de la descarga (punto 2) y la succión de la bomba (punto 1) con respecto a cierta referencia de nivel

e_{loss} es la energía específica perdida en fricción, calculada para el sistema entre los puntos elegidos 1 y 2.

El trabajo específico desarrollado por la bomba también puede ser expresado en términos de columna de la bomba. La ecuación de la columna desarrollada por la bomba se muestra a continuación. La columna desarrollada por la bomba en la ecuación siguiente es la columna indicada en los documentos de curvas de bombas compartidos por los fabricantes de bombas.

$$h_{pump} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{\alpha}{2g} (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2) + (z_2 - z_1) + h_{loss}$$

En donde,

h_{loss} es la columna perdida en la fricción, calculada para el sistema entre los puntos elegidos 1 y 2. Este término es frecuentemente considerado despreciable, a menos de que haya una gran distancia entre los puntos 1 (succión) y 2 (descarga).

El cálculo de estos parámetros puede ser llevado a cabo en una hoja de cálculo en computadora, ingresando los valores de los parámetros medidos en campo, de manera tal que sea posible graficarlos con respecto al tiempo del periodo de medición. Veamos algunos ejemplos de análisis en unidades de bombeo.

Ejemplo de evaluación de la eficiencia de una bomba de tipo turbina vertical

Un tipo de bomba comúnmente utilizada tanto en industria como en servicios municipales es la bomba de tipo turbina vertical (*vertical turbine pump - VTP*). La Figura 21 muestra una aplicación de una bomba de turbina vertical.

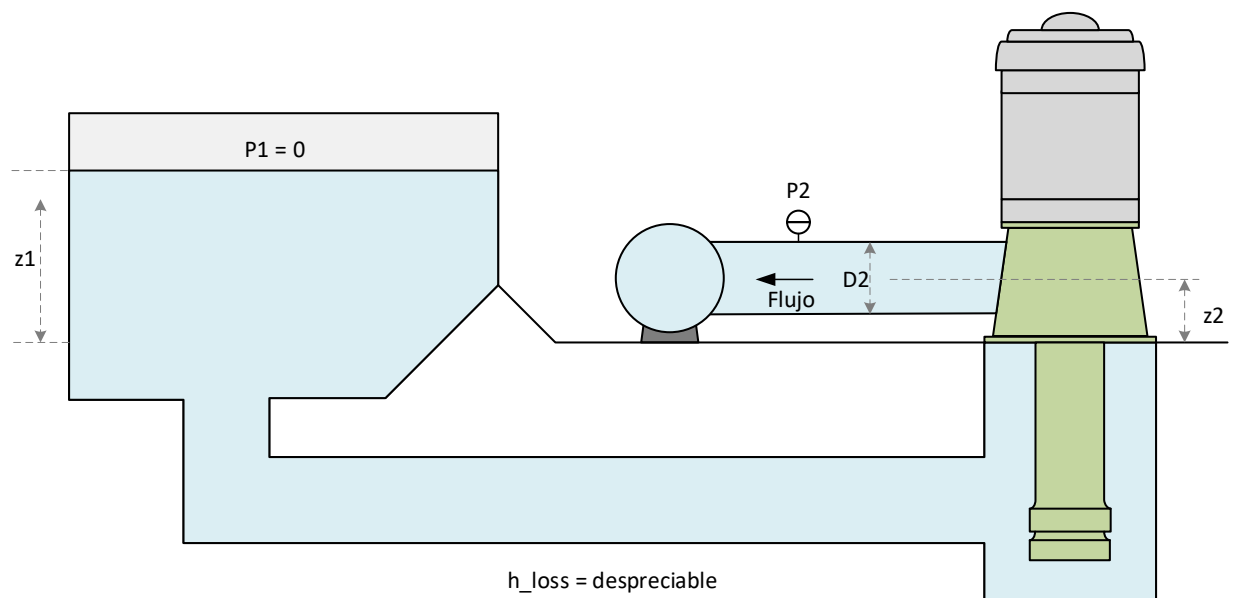


Figura 21. Diagrama de instalación de sistema de bombeo con bomba de tipo turbina vertical.

El trabajo específico desarrollado por la bomba en este caso se obtiene por la ecuación general de la energía aplicada para sistemas de bombeo, en la que, convenientemente, algunos términos desaparecen por ser cero o despreciables.

$$w_{pump} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{\alpha}{2} \bar{V}_2^2 + g(z_2 - z_1)$$

A continuación, se muestran gráficas de parámetros medidos y calculados en una instalación de una bomba de tipo turbina vertical.

La Figura 22 muestra el perfil de nivel del tanque de alimentación en el tiempo. Este valor es el nivel del tanque con respecto a su piso, sin embargo, el piso del tanque no es necesariamente el nivel de referencia utilizado para nuestro análisis. En la ecuación anterior, este nivel corresponderá a z_1 una vez referenciado a la referencia correcta. Esta medición fue hecha por un medidor de nivel y registrado en un sistema de monitoreo del usuario.

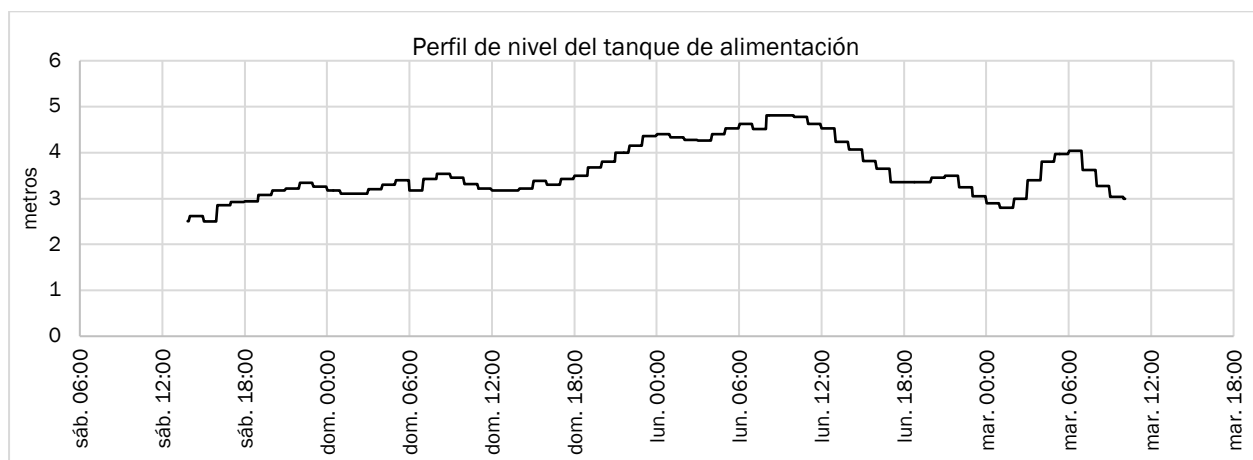


Figura 22. Perfil de nivel del tanque de alimentación de una VTP.

La Figura 23 muestra el perfil de presión manométrica en bares a la descarga de la bomba. Se observa una caída al inicio de la medición y al final, indicando que la bomba fue apagada en esos momentos.

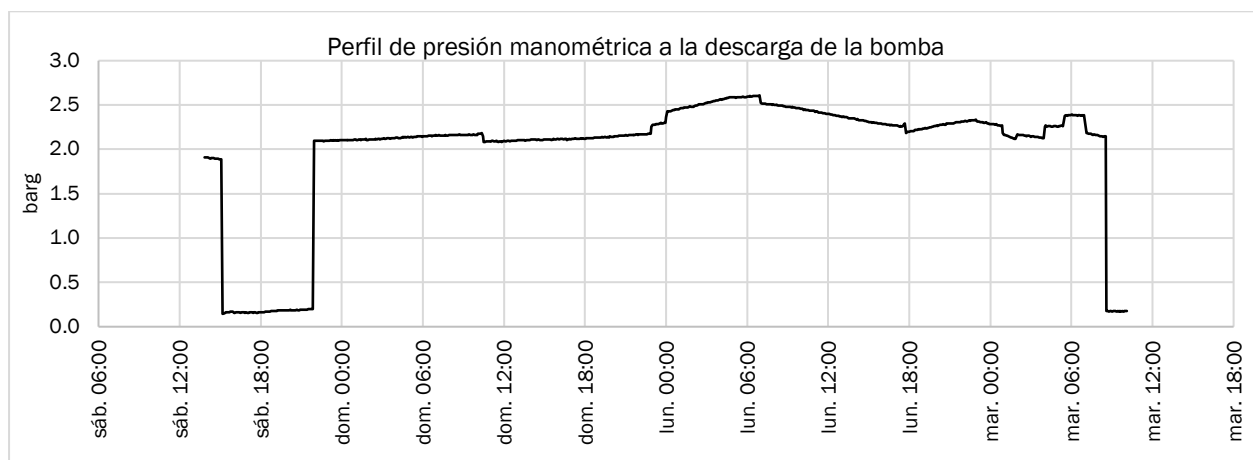


Figura 23. Perfil de presión manométrica medida a la descarga de la VTP.

La Figura 24 muestra el perfil de la columna desarrollada por la bomba. Observe que el perfil de columna tiene un perfil similar pero opuesto al perfil del caudal de la bomba, mostrado en la Figura 25.

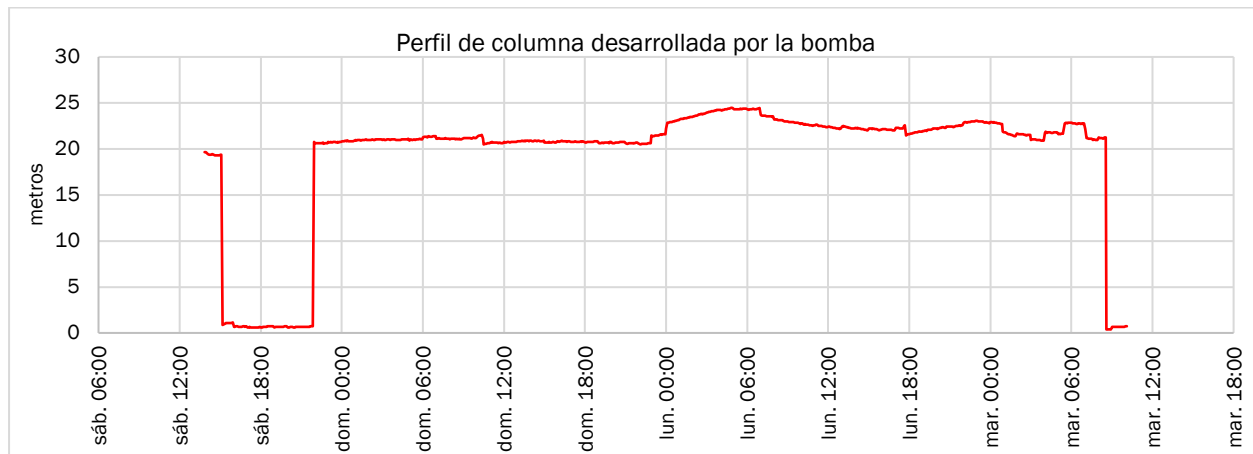


Figura 24. Perfil de columna desarrollada por la VTP.

La Figura 25 muestra el perfil de caudal de agua impulsado por la bomba, medido con un medidor de flujo ultrasónico.

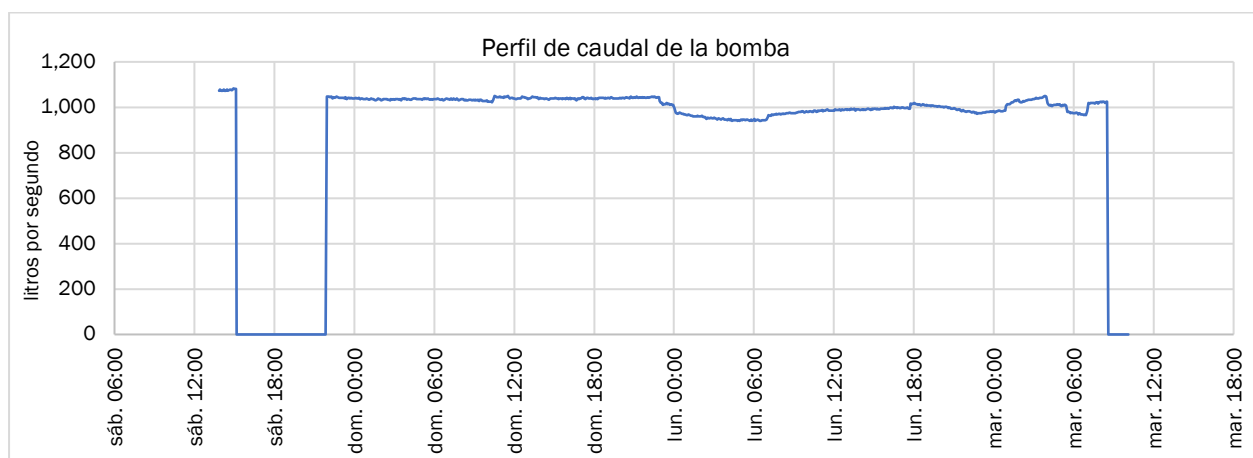


Figura 25. Perfil de caudal medido de la VTP.

La Figura 26 muestra el perfil de potencia eléctrica (verde) medida en sitio en la alimentación eléctrica del motor eléctrico. El perfil de potencia hidráulica (rojo) es calculado a partir de las mediciones hidráulicas realizadas en sitio.

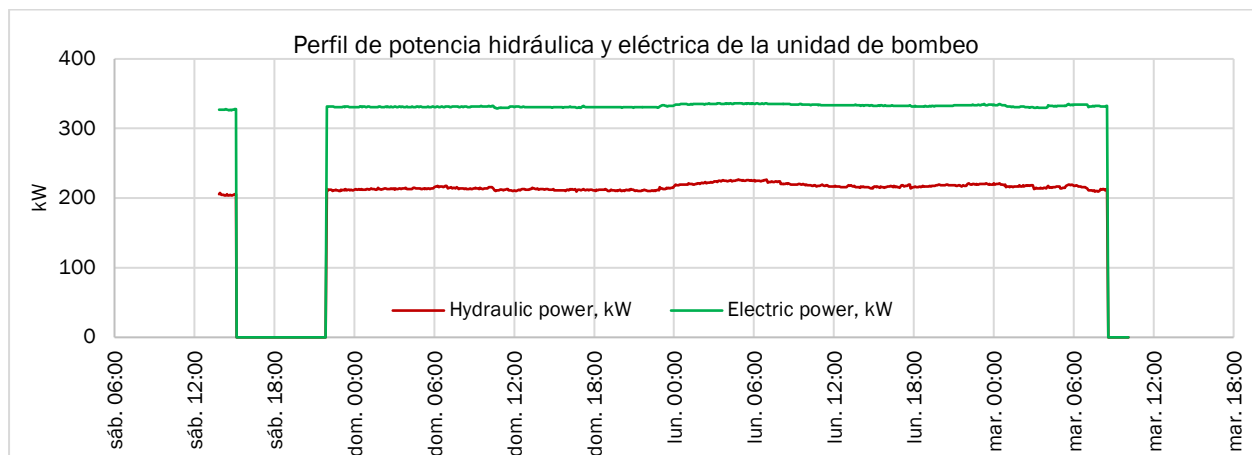


Figura 26. Perfil de kW eléctricos medidos y kW hidráulicos calculados de la VTP.

La Figura 27 muestra el perfil de eficiencia de conversión de energía mecánica a hidráulica de la bomba. Este perfil fue calculado tomando en consideración que el motor opera con una eficiencia constante de 95% (dato de placa del motor eléctrico).

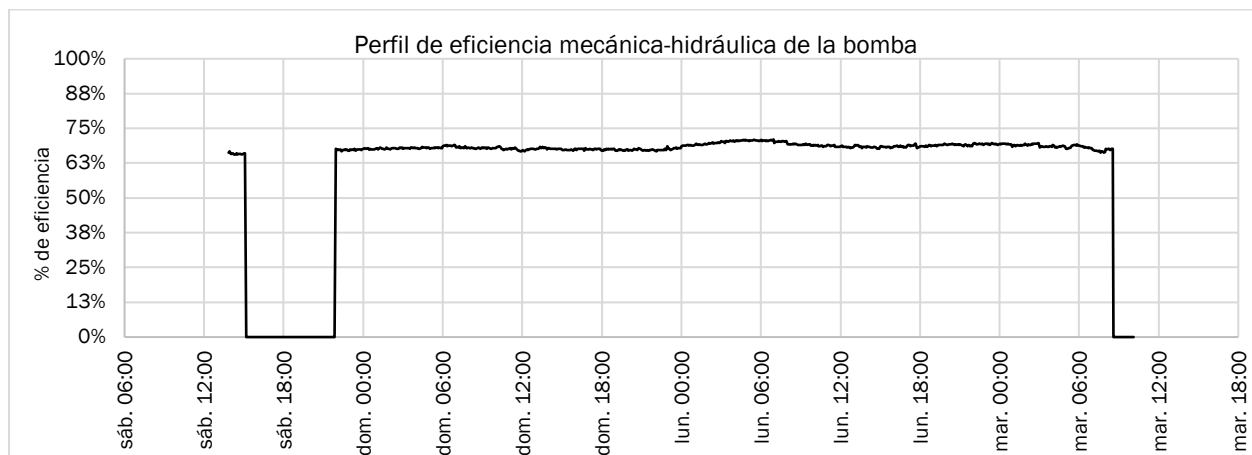


Figura 27. Perfil de eficiencia calculada de la bomba, tomando en consideración $\eta_{motor} = 95\%$.

Las bombas de tipo turbina vertical de esta escala de gran caudal y potencia, pueden llegar a tener eficiencias de conversión de energía en el orden de 80% cerca de su mejor punto de operación. Existen varias razones por las cuales una bomba de tipo turbina vertical pudiese mostrar una eficiencia de conversión de energía menor. Algunas de estas razones son:

- Desgaste normal por antigüedad
- Desgaste anormal por condiciones adversas
- Selección errónea de la bomba para las condiciones deseadas de columna y caudal
- Colocación temporal de la bomba en su ubicación, por razones de emergencia, después se quedó en dicha ubicación
- Falta o deficiencia de ajustes de inclinación de álabes del impulsor en sitio

Ejemplo de evaluación de la eficiencia de una bomba de tipo split case

Un tipo de bomba comúnmente utilizada tanto en industria como en servicios municipales es la bomba de tipo Split case. La Figura 28 muestra una aplicación de una bomba de tipo Split case.

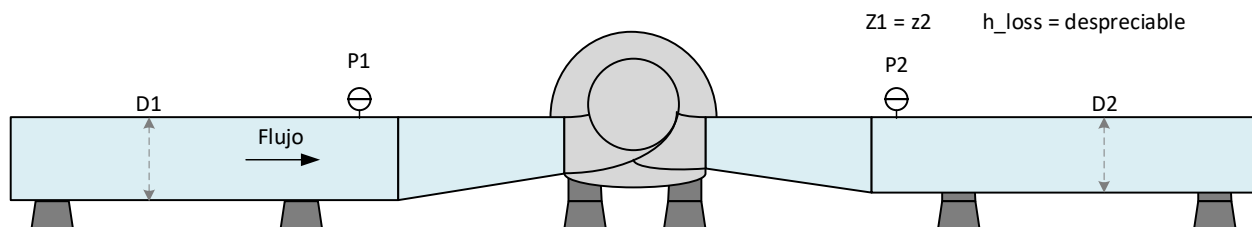


Figura 28. Diagrama de instalación de sistema de bombeo con bomba de tipo Split case.

El trabajo específico desarrollado por la bomba en el caso descrito por la Figura 28 se obtiene por la ecuación general de la energía aplicada para sistemas de bombeo, en la que, convenientemente, algunos términos desaparecen por ser cero o despreciables.

$$w_{pump} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{\alpha}{2} (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2)$$

A continuación, se muestran gráficas de parámetros medidos y calculados en una instalación de una bomba de tipo Split case. En la Figura 29 se muestran los perfiles de presión a la succión y a la descarga de la bomba.

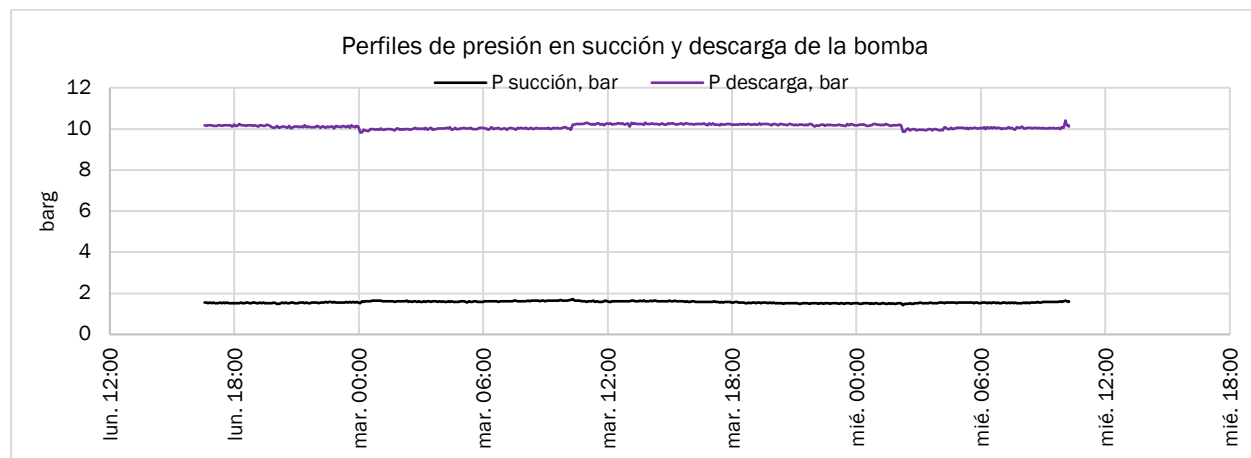


Figura 29. Perfil de presión manométrica medida a la succión y descarga de una bomba Split case.

La Figura 30 muestra el perfil de columna desarrollada por la bomba tipo Split-case. Las variaciones de la columna se deben al encendido y apagado de bombas en paralelo.

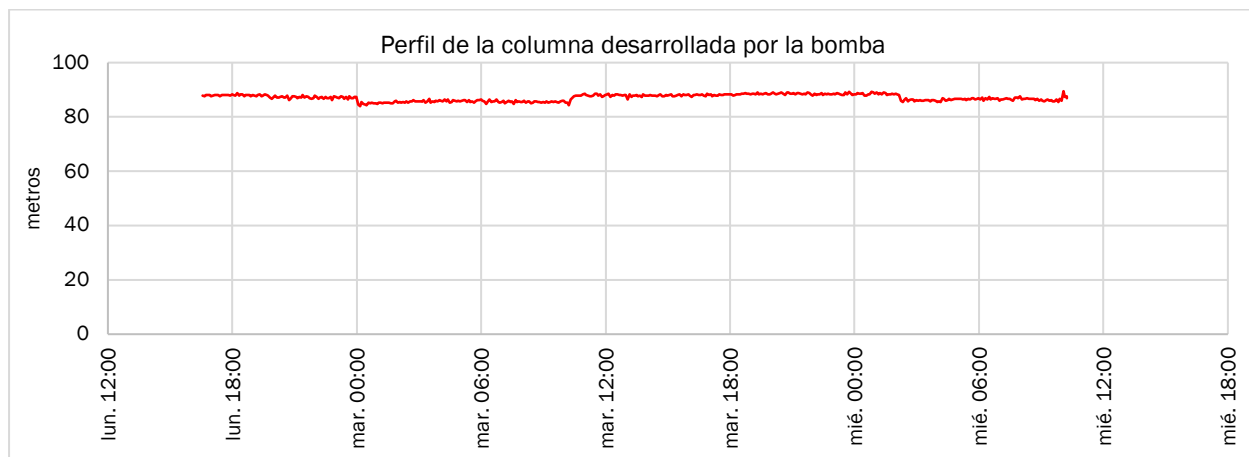


Figura 30. Perfil de columna desarrollada por la bomba Split case.

La Figura 31 muestra el perfil del caudal impulsado por la bomba. Observe que el perfil del caudal es un reflejo del perfil de la columna. Cuando la columna disminuye, el caudal aumenta y viceversa. Este comportamiento se demuestra de manera gráfica en la curva de la bomba.

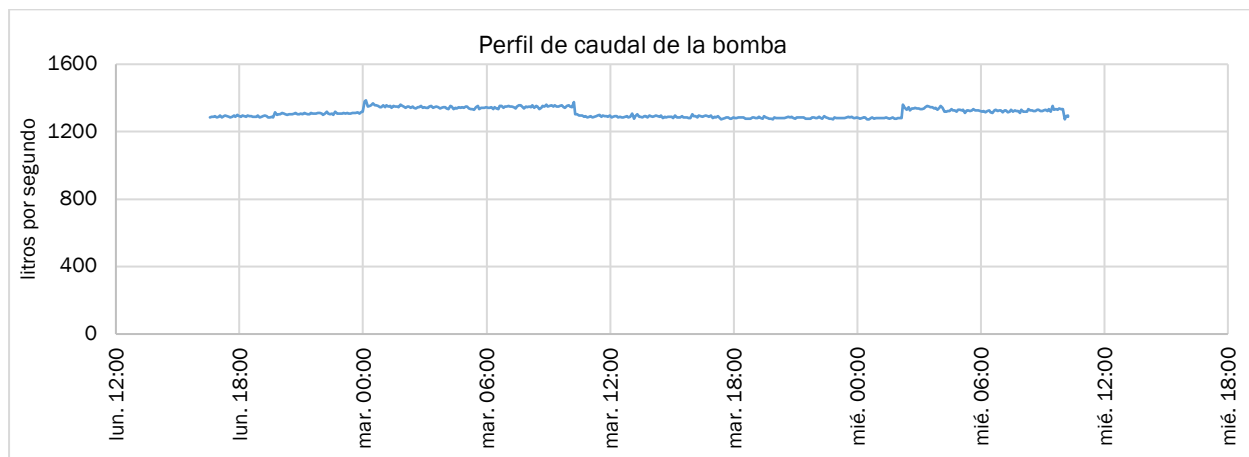


Figura 31. Perfil de caudal medido en la bomba Split case.

La Figura 32 muestra los perfiles de potencia hidráulica y eléctrica de la bomba. Observe que la potencia hidráulica (rojo) es cercana a la potencia eléctrica de entrada al motor (verde).

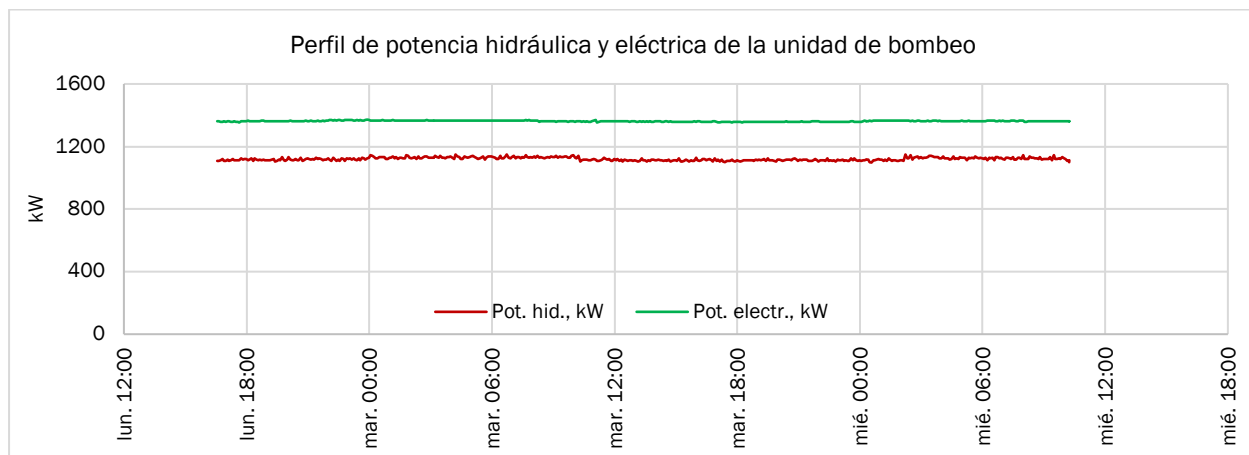


Figura 32. Perfil de kW eléctricos medidos y kW hidráulicos calculados de la bomba Split case.

La Figura 33 muestra la curva de la eficiencia de conversión de energía mecánica a hidráulica de la bomba tipo Split-case evaluada. Esta bomba está operando con una eficiencia considerada muy buena. Este perfil fue calculado tomando en consideración que el motor opera con una eficiencia constante de 95% (dato de placa del motor eléctrico).

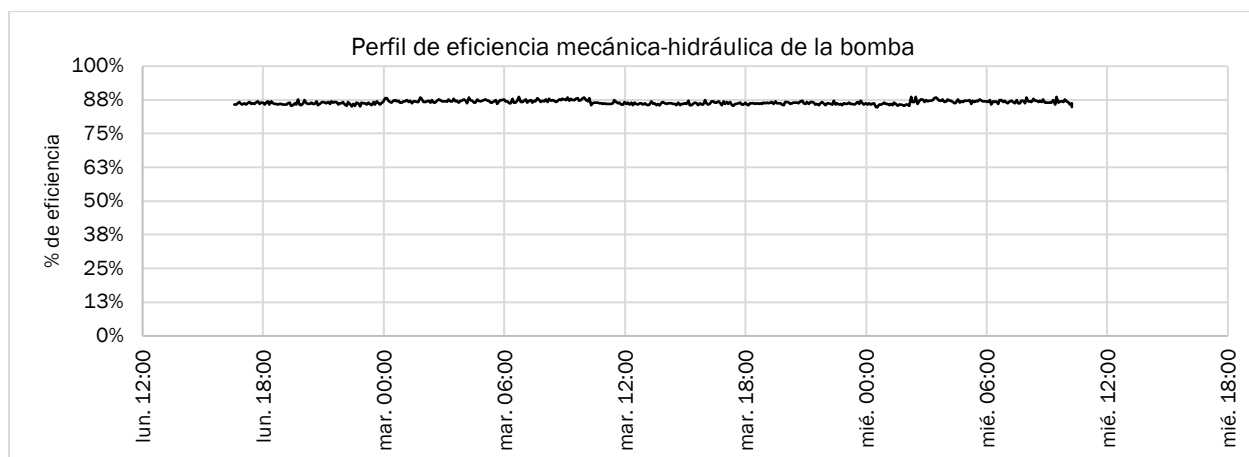


Figura 33. Perfil de eficiencia calculada de la bomba, tomando en consideración $\eta_{motor} = 95\%$.

Las bombas de tipo Split-case de mediano a gran caudal y potencia, pueden llegar a tener eficiencias de conversión de energía en el orden de 90% cerca de su mejor punto de operación, factor que debe de ser tomado en cuenta al realizar la evaluación de reemplazo de una bomba que no se está desempeñando con una eficiencia razonablemente buena.

Ejemplo de evaluación de la eficiencia de una bomba de tipo sumergible para pozo profundo

Las bombas para extracción de agua de pozos profundos pueden ser de dos tipos, con motor montado en una base en la superficie del pozo o con motor sumergible. El análisis de potencia hidráulica de ambos es equivalente. La Figura 34 muestra ambos tipos de unidades de bombeo para aplicación de pozo profundo.

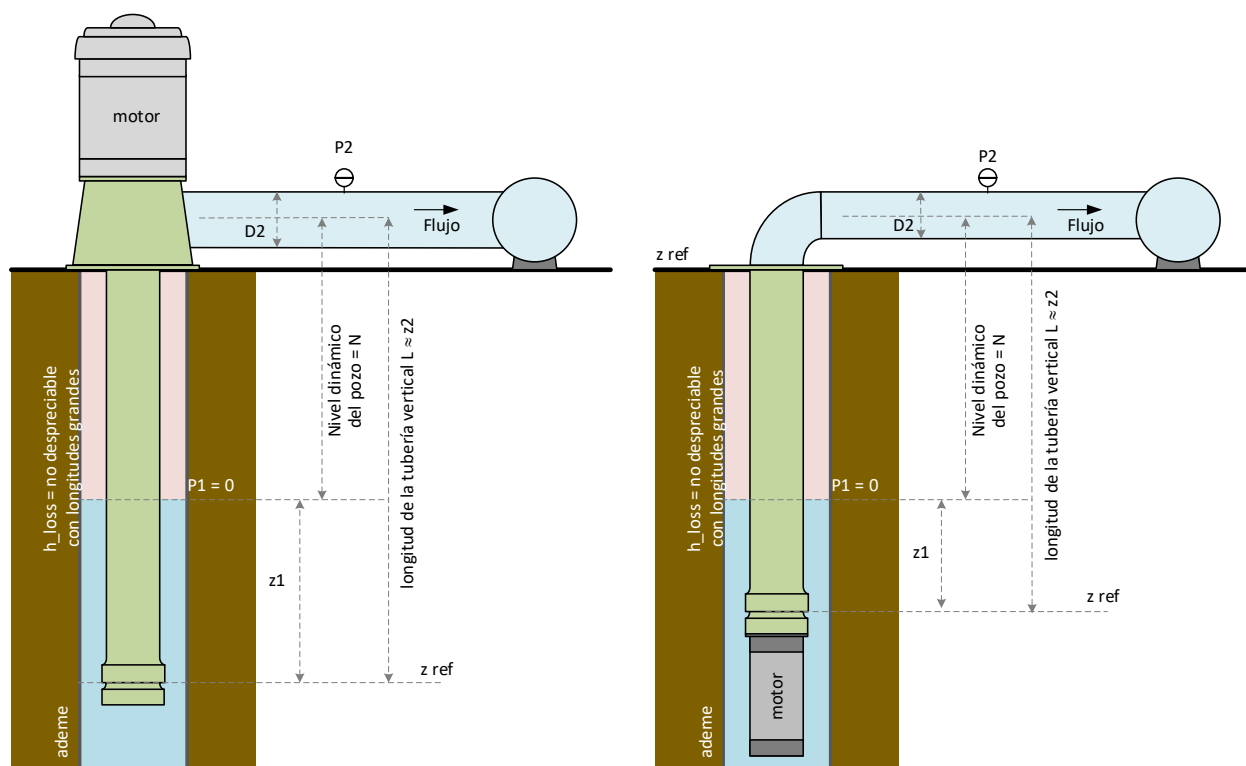


Figura 34. Dos tipos de pozos profundos de extracción de agua.

En la Figura 34, el nivel dinámico es definido como la longitud vertical desde la superficie hasta el espejo de agua del pozo cuando la bomba está en operación y contrasta del nivel estático del pozo, definido como la longitud vertical desde la superficie hasta el espejo de agua del pozo cuando la bomba está apagada. El nivel dinámico del pozo está indicado en la Figura 34 y lo denotamos con la letra N.

El parámetro del nivel dinámico del pozo puede ser medido con una cinta métrica especial llamada sonda. Esta cinta se introduce por un orificio entre la tubería ascendente y el ademe y emite una alarma cuando la punta toca el agua.



Figura 35. Sonda para medición de nivel dinámico. Marca Allegiance. Fotografía propiedad de Allegiance.

La ecuación general de la energía aplicada para las bombas aplicada para unidades de bombeo de pozo profundo se simplifica, ya que algunos de sus parámetros son cero. En particular, eligiendo el Punto 1 como el espejo de agua del pozo dentro del ademe, la presión manométrica del Punto 1 es cero y la velocidad en el Punto 1 es cero. Por conveniencia, elegiremos el nivel de referencia como la ubicación de los tazones de la bomba. Estos tazones se encuentran sumergidos debajo del nivel dinámico del pozo, evidentemente.

De manera tal que,

$$z_2 = L$$

Y,

$$z_1 = L - N$$

Por lo tanto,

$$w_{pump} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{\alpha}{2} \bar{V}_2^2 + gN + e_{loss}$$

Para pozos en los que la bomba está a una profundidad considerable, entre los tazones sumergidos de la bomba hasta el Punto 2 de nuestro análisis, el agua que fluye causa pérdidas de fricción en la tubería ascendente. Esta fricción resulta en energía específica perdida que debe de ser aportada como trabajo específico en la bomba. Cabe mencionar que ésta pérdida de fricción puede ser omitida del análisis si la longitud de la tubería ascendente del pozo es relativamente corta. Esta consideración se deja al criterio del especialista que ejecuta el análisis.

La energía específica perdida en la fricción puede ser también expresada como columna perdida de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$h_{loss} = \frac{e_{loss}}{g}$$

A su vez, la columna perdida es calculada por la siguiente ecuación.

$$h_{loss} = f \frac{L}{D} \cdot \frac{\bar{V}^2}{2g} + K_x \cdot \frac{\bar{V}^2}{2g}$$

En donde,

L es la longitud de la tubería ascendente del pozo,

D es el diámetro de la tubería ascendente del pozo,

K_x es el factor de pérdida de un codo de 90° cuyo valor numérico es de 0.3 (referirse a tablas de factores de pérdidas en accesorios de tubería).

f es un factor llamado factor de Darcy, que es calculado con la siguiente fórmula empírica.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

En donde,

Re es el número de Reynolds evaluado en la tubería ascendente del pozo, evalúe este valor con la fórmula correspondiente para obtener el número de Reynolds.

ϵ es la rugosidad absoluta de la tubería (dependiente del material de la tubería ascendente).

D es el diámetro de la tubería ascendente.

A continuación, se muestran gráficas de parámetros medidos y calculados en una instalación de una bomba de extracción de agua de pozo profundo. En la Figura 36 se muestra el perfil de presión manométrica en el Punto 02 (nivel de superficie del pozo) y el perfil del caudal, medido con un medidor de caudal con ultrasonido.

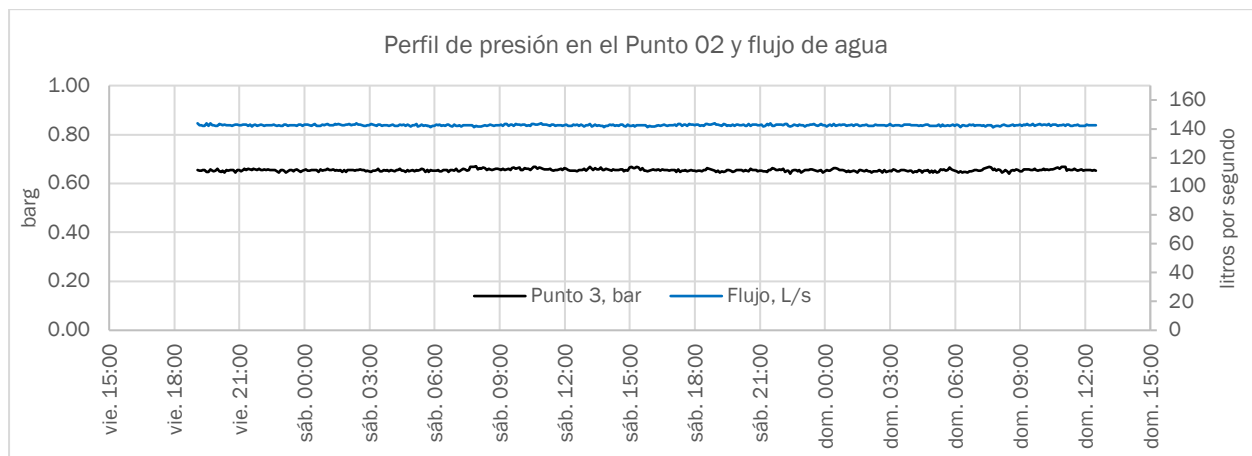


Figura 36. Perfil de presión manométrica en el Punto 02 y caudal de la bomba.

La Figura 37 muestra el perfil de columna calculada como desarrollada por la bomba, evaluada entre el Punto 01 y el Punto 02, ilustrados en la Figura 34. Note que, en el caso de la bomba evaluada, la columna corresponde en mayor medida a la altura o longitud de la tubería ascendente, que a la presión manométrica en la superficie del pozo.

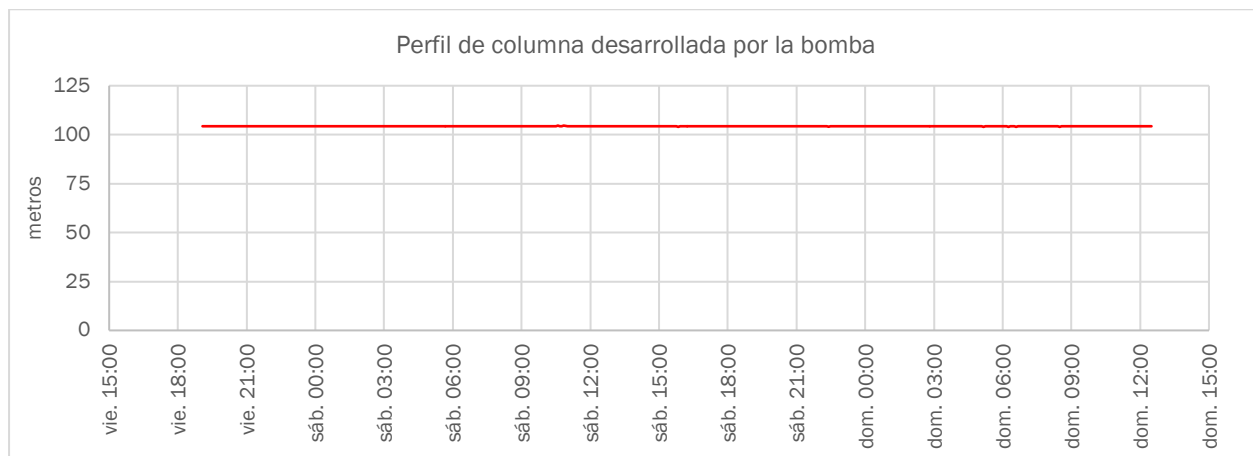


Figura 37. Perfil de columna desarrollada por la bomba, evaluada entre Punto 01 y Punto 02.

La Figura 38 muestra los perfiles de la potencia hidráulica que entrega la bomba al agua y la potencia eléctrica que la unidad de bombeo demanda de la red eléctrica.

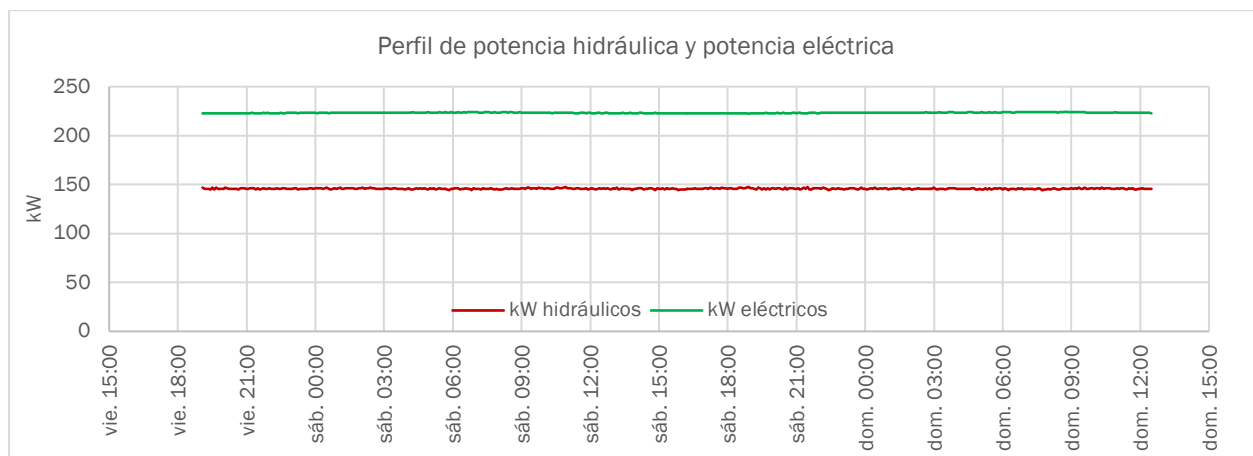


Figura 38. Perfil de kW eléctricos medidos y kW hidráulicos calculados de la bomba.

La Figura 39 muestra el perfil de la eficiencia de conversión de potencia mecánica a potencia hidráulica de la bomba.

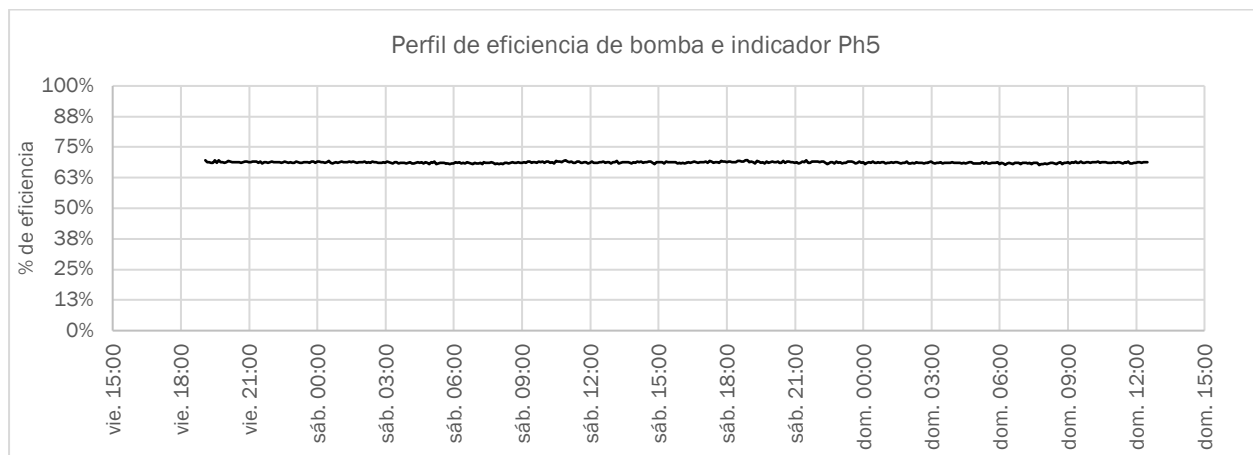


Figura 39. Perfil de eficiencia calculada de la bomba, tomando en consideración $\eta_{motor} = 95\%$.

Cabe mencionar que las condiciones hidráulicas de los pozos no son constantes en el tiempo. Los niveles estático y dinámico de los pozos pueden cambiar en función de la temporada anual y/o en la frecuencia de la lluvia en la región. Por esta razón, las condiciones de columna y flujo, y, la eficiencia de la bomba, pueden cambiar en el tiempo.

Se recomienda tomar en consideración este factor, en la selección de una bomba que opere la mayor parte de su vida, en una región de eficiencia óptima. Por esta razón, se recomienda tener un registro periódico del nivel dinámico del pozo de al menos un año. La bomba que sea elegida para dicho pozo preferentemente deberá de tener una curva cuyo caudal no varíe considerablemente con respecto a cambios en la columna, y que pueda operar con seguridad en todo el rango de columna de acuerdo con el registro anual de nivel dinámico.

Ejemplo de evaluación de una bomba centrífuga de aplicación general

Una instalación de bombeo centrífugo de aplicación general puede ser ilustrado como en la Figura 40. En este ejemplo, la bomba succiona agua directamente de un tanque cuyo nivel puede ser conocido o desconocido.

En ciertas instalaciones, la tubería de succión no tiene una preparación para la medición de presión manométrica en la succión de la bomba, en cuyo caso es necesario conocer el valor del nivel de agua del tanque con respecto a la referencia que elegimos para nuestro análisis.

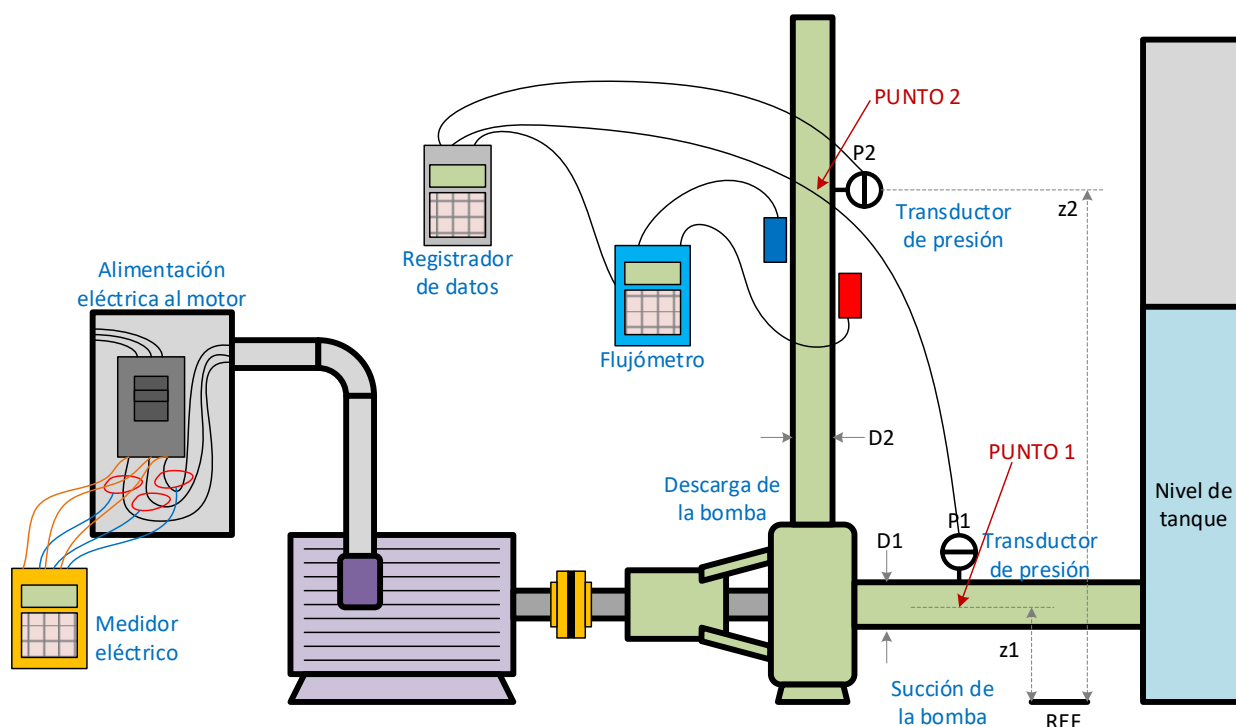


Figura 40. Instalación típica de bomba centrífuga (se incluyen instrumentos de medición para la evaluación).

A continuación, se muestra el análisis de la eficiencia de conversión de energía de una bomba centrífuga de uso general.



Figura 41. Bombas centrífugas de aplicación general en industria.

La Figura 42 muestra los perfiles de presión manométrica de succión y de descarga de la bomba. El cambio de presión manométrica de descarga cambia en el tiempo. Esto se debe a que la bomba forma parte de un par de bombas en paralelo, que encienden y apagan en función de la necesidad de caudal del proceso. Cuando sólo opera una bomba, la presión de descarga es menor y el flujo es mayor (ver la Figura 43).

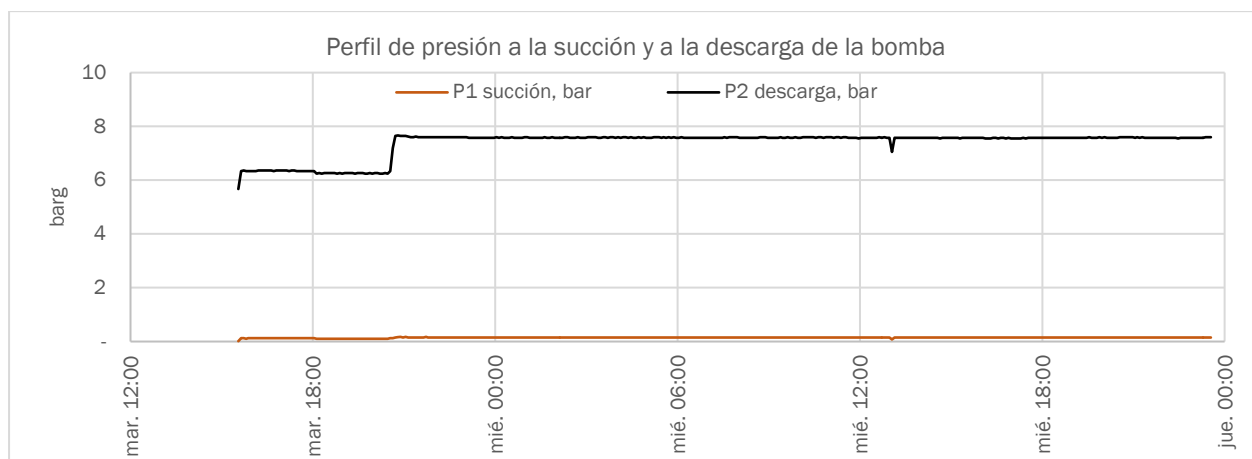


Figura 42. Perfiles de presión a la succión y a la descarga de la bomba.

La Figura 43 muestra el perfil de caudal de la bomba. Observe el escalón que corresponde a la operación de solamente esta bomba y cuando se enciende la bomba en paralelo a esta.

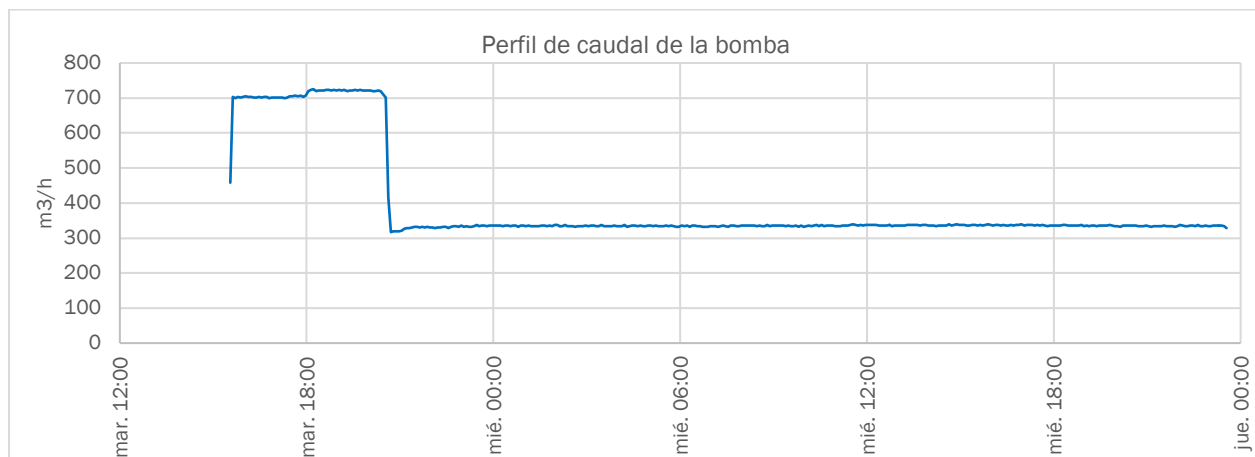


Figura 43. Perfil del caudal de la bomba.

La Figura 44 muestra la columna desarrollada por la bomba, calculada en función de los parámetros medidos en campo.

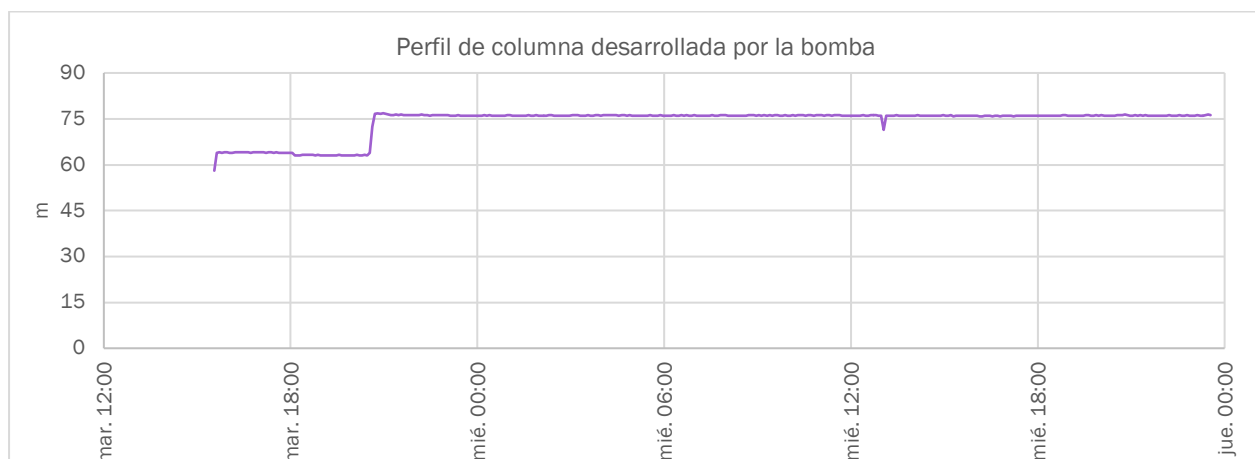


Figura 44. Perfil de la columna desarrollada por la bomba.

La Figura 45 muestra los perfiles de potencia hidráulica, mecánica y eléctrica de la unidad de bombeo. Observe que el encendido y apagado de bombas en paralelo en un sistema hidráulico, tienen impacto en la potencia de la unidad de bombeo y en el costo de operación.

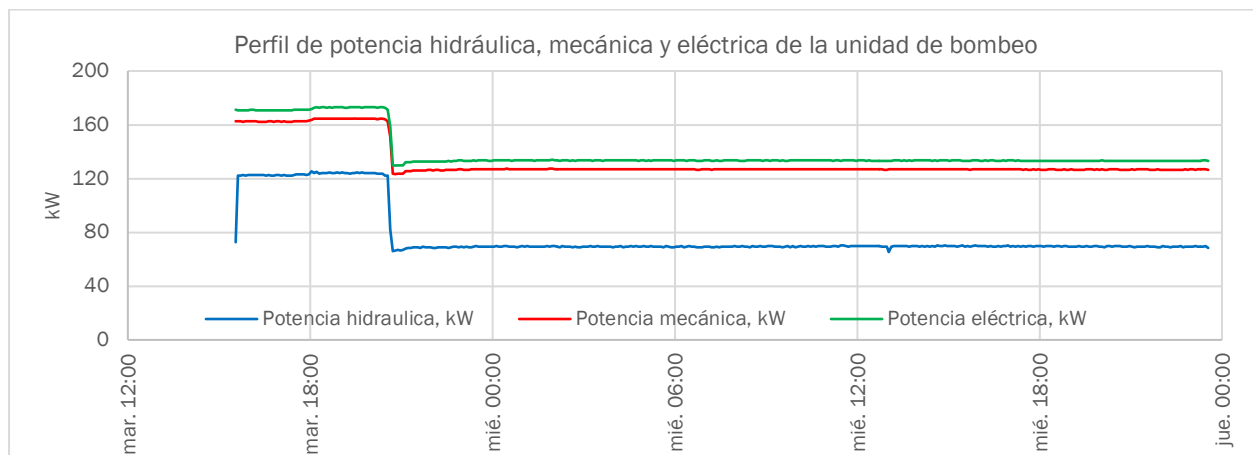


Figura 45. Perfiles de potencia hidráulica, mecánica y eléctrica de la unidad de bombeo.

La eficiencia de la bomba también se ve afectada por el encendido y apagado de demás bombas en paralelo. Esto se refleja en que el punto de operación de la bomba se aleja o se acerca a su punto de mejor eficiencia.

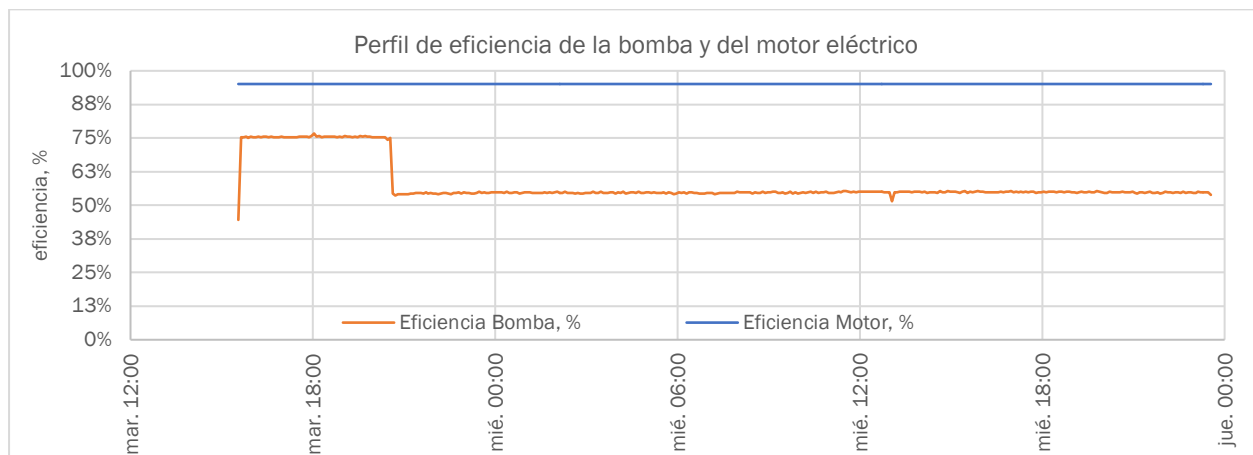


Figura 46. Perfiles de eficiencia de la bomba y del motor eléctrico.

En los sistemas industriales, frecuentemente hay bombas encendiendo y apagando en paralelo. Al analizar la eficiencia de las unidades de bombeo para futuro reemplazo, se recomienda tomar en consideración las condiciones de columna y de caudal de todos los escenarios posibles de combinaciones de bombas en paralelo, y elegir la bomba que más proporción del tiempo, permanezca lo más cerca posible a su mejor punto de eficiencia.

Ejemplo de análisis de ahorros por reemplazo de una válvula de estrangulación por un VFD

Frecuentemente, en los procesos industriales, existe la necesidad de reducir el caudal de agua que una bomba alimenta a un sistema hidráulico. Para este propósito se cierra parcialmente una válvula manual a la descarga de la bomba (ver Figura 47). Este método de control de caudal es sencillo y efectivo en cumplir el objetivo de reducir el flujo, sin embargo, en términos de desempeño energético, no es el óptimo.

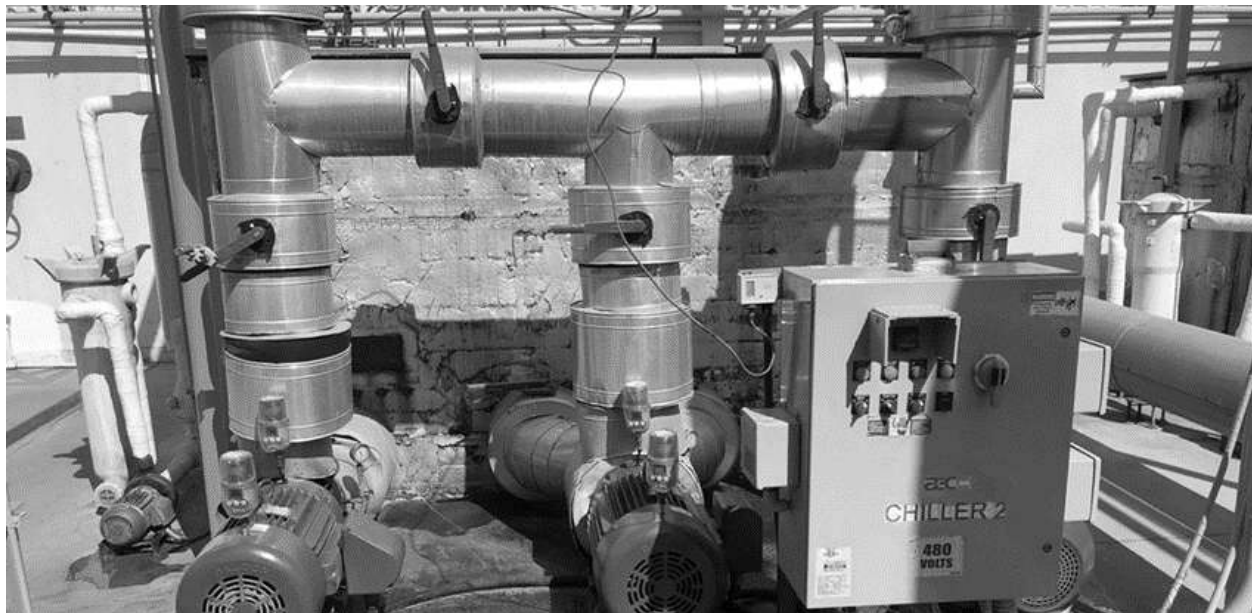


Figura 47. Bomba centrífuga (izquierda) con válvula de estrangulación para reducción del caudal.

El sistema de la Figura 47 ilustra el cambio de la curva del sistema al cerrar parcialmente la válvula a la descarga de la bomba.

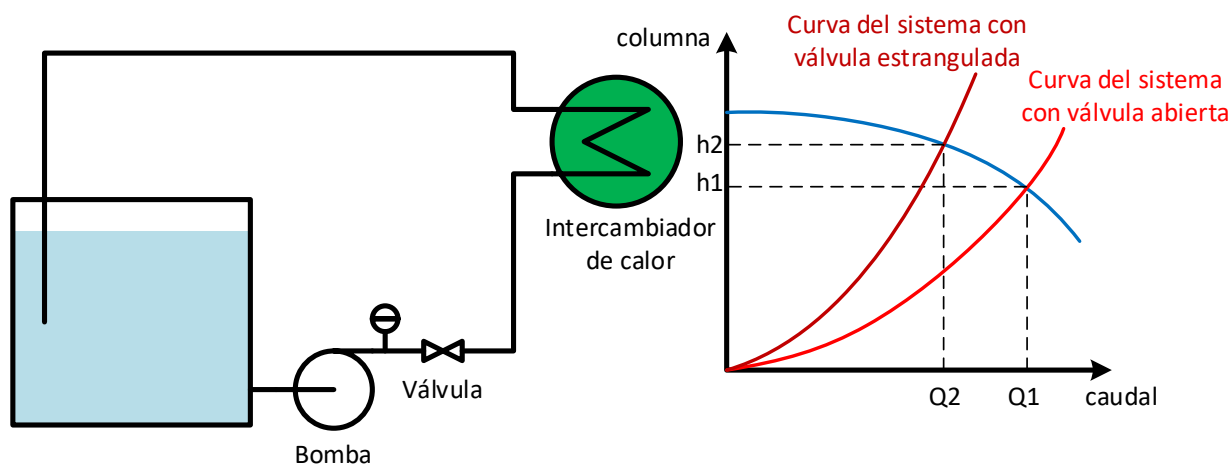


Figura 48. Cambio en la curva del sistema al estrangular el flujo con una válvula.

En la Figura 48, el punto de operación del sistema con la válvula 100% abierta y la bomba es la intersección en Q1 (caudal) y h1 (columna). Es posible que para el proceso industrial del que este sistema hidráulico forma parte, Q1 sea más caudal que el necesario, de manera tal que el personal cierre parcialmente la válvula hasta lograr el caudal deseado Q2.

Esta acción resulta en que la columna del sistema aumenta más abruptamente en función del caudal, o bien, que el sistema tiene mayor fricción. La curva del sistema se desplaza hacia la izquierda, de tal manera que el punto de intersección entre la curva de la bomba y la nueva curva del sistema está en Q2 y en h2. La presión indicada en el manómetro a la descarga de la bomba y antes de la válvula mostrará un valor mayor que aquel con la válvula 100% abierta.

Esta acción tiene varias consecuencias, que se listan a continuación.

- El caudal es reducido efectivamente de Q1 a Q2, cumpliendo el requerimiento del proceso industrial.
- La eficiencia de la bomba puede cambiar entre su punto de operación original y el nuevo punto de operación.
- La potencia hidráulica de la bomba será muy probablemente menor con la válvula estrangulada que con la válvula completamente abierta (depende de la pendiente de la curva de la bomba). Usted puede calcular la potencia hidráulica de la bomba con la siguiente ecuación:

$$\dot{W}_{pump} = h_{pump} \cdot g \cdot \rho \cdot Q$$

En donde,

Q es el caudal, equivalente a $\dot{V}$.

El método óptimo de control de caudal es mediante la reducción de la velocidad de rotación de la bomba. Esto se puede lograr con un variador de velocidad variable (*variable frequency drive – VFD*) en la alimentación del motor eléctrico de la unidad de bombeo.

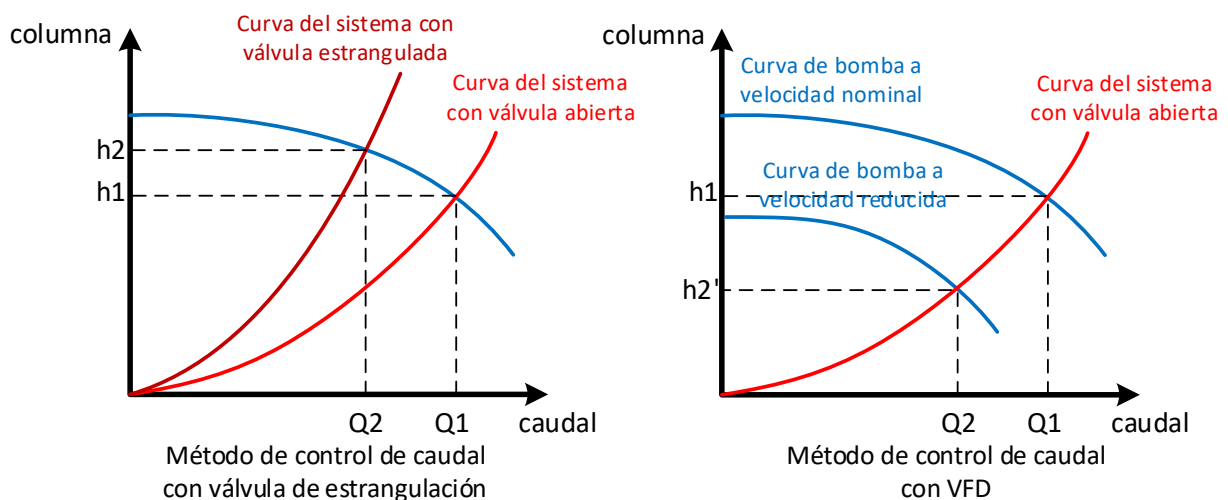


Figura 49. Comparación de métodos de control de caudal en un sistema hidráulico.

Al reducir la velocidad de rotación de la bomba, la curva de la bomba se encoje (ver Figura 49). La velocidad de la bomba debe de reducirse hasta que el caudal sea el deseado, indicado por la intersección de la curva de la bomba a la velocidad reducida y la curva del sistema con la válvula 100% abierta.

La reducción en potencia hidráulica a la salida de la bomba por lograr el caudal con un VFD en contraste a con una válvula de estrangulación, se da por la siguiente ecuación:

$$\Delta \dot{W} = (h_2 - h'_2) \cdot \rho \cdot g \cdot Q_2$$

Un sistema hidráulico estrangulado, con una bomba de 40hp, fue evaluado en un sitio industrial, para calcular el beneficio económico de reemplazar la válvula de estrangulación con un VFD.

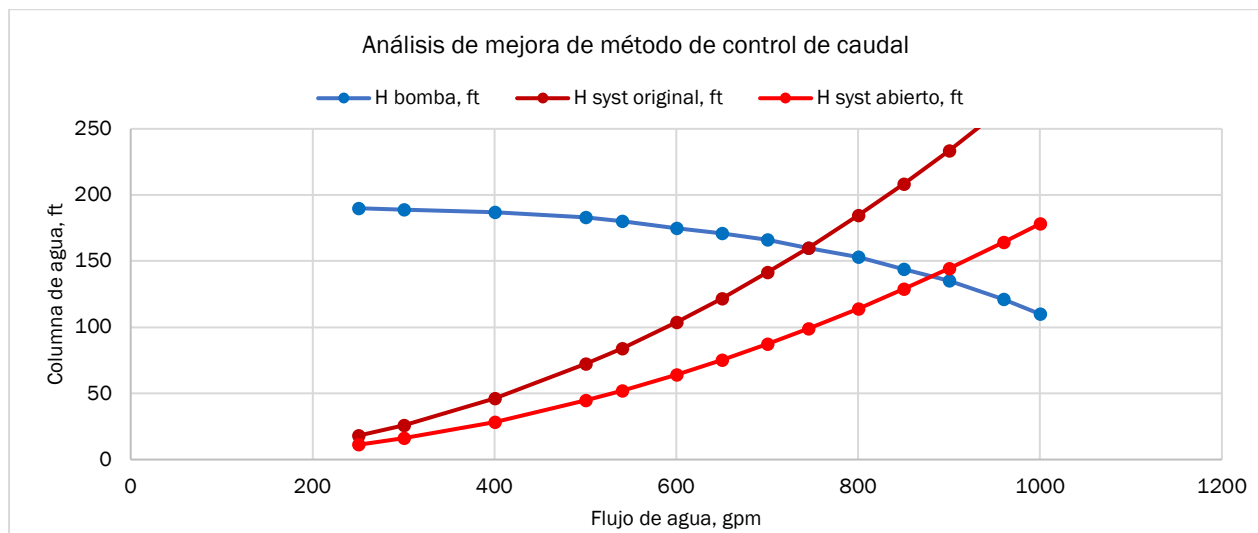


Figura 50. Análisis de mejora por uso de VFD como reemplazo de una válvula de estrangulación.

La Figura 50 muestra el análisis del sistema hidráulico evaluado en el sitio industrial.

La diferencia de columna h_2 y h'_2 es:

$$160ft - 99ft = 61ft$$

La reducción de potencia hidráulica se calcula con la ecuación descrita anteriormente, con los valores del sistema analizado en campo (el análisis mostrado es hecho con unidades de sistema inglés, sin embargo, se recomienda realizarlo con unidades del sistema internacional para no lidiar con un valor de g_c distinto de 1, omitido por simplicidad en cálculos con unidades del sistema internacional):

$$\dot{W}_h = \Delta h \cdot g \cdot \rho \cdot Q = \frac{61 \text{ ft} \cdot 62.4 \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^3} \cdot 32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2}}{32.2 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2}} \cdot 745 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \cdot \frac{448.8 \frac{\text{gal}}{\text{min}}}{\frac{\text{ft}^3}{\text{s}}} = 6,327.16 \frac{\text{lb}_f \cdot \text{ft}}{\text{s}}$$

$$\dot{W}_h = 6,327.16 \frac{lb_f \cdot ft}{s} \cdot \frac{1.36 W}{1 \frac{lb_f \cdot ft}{s}} \cdot \frac{1 kW}{1000 W} = 8.57 kW$$

El resultado de la evaluación es que, por reemplazar el método de reducción de caudal de la válvula de estrangulación por un VFD, la bomba entrega el mismo caudal requerido de 745 gpm pero con 8.57kW hidráulicos menos.

Existen ciertas consideraciones a tomar en la implementación del reemplazo de método de reducción de caudal:

- La eficiencia de la bomba puede cambiar al mover el punto de operación de la bomba. Este cambio puede ser a un valor de eficiencia más alto o bajo.
- A muy baja velocidad del motor eléctrico, es posible que el ventilador del motor no retire efectivamente el calor del motor, en cuyo caso habrá que ventilar dicho motor con un ventilador externo.
- El VFD ofrece una versatilidad para la automatización del proceso, en caso de que el proceso requiera distintos valores de caudal en diferentes momentos. Esto es una ventaja operativa de contar con un VFD.
- En sistemas hidráulicos abiertos, es posible que haya un valor de velocidad del motor eléctrico en el cual la bomba no sea capaz de vencer la columna hidrostática del sistema, en cuyo caso, el caudal tendrá valor cero. Esta es una situación indeseable que puede dañar a la bomba, por lo tanto, es conveniente conocer la curva del sistema para conocer los límites de operación que ofrece un VFD.

Los VFDs no ofrecen ahorro de energía y ahorro en costos de operación solamente por ser instalados, sino que exigen que ciertas condiciones se cumplan, como la condición del reemplazo de válvulas de estrangulación, en cuyo caso, son alternativas muy atractivas para realizar la misma tarea con un mejor desempeño energético y menores costos de operación del bombeo.

Ejemplo de bomba centrífuga que opera en una región inestable

Una bomba centrífuga de 300hp en un sitio industrial tiene una curva como la mostrada en la siguiente figura. Al realizar mediciones hidráulicas y eléctricas de la bomba, se identificó que el comportamiento del caudal es muy variable, comportamiento anormal para dicha aplicación.

Analizando la curva de la bomba, se determinó que la causa del comportamiento de la bomba es que está operando en una región de su curva que es prácticamente horizontal. Observe la Figura 51 de la curva de esta bomba en particular y la Figura 52 del caudal medido en la bomba.

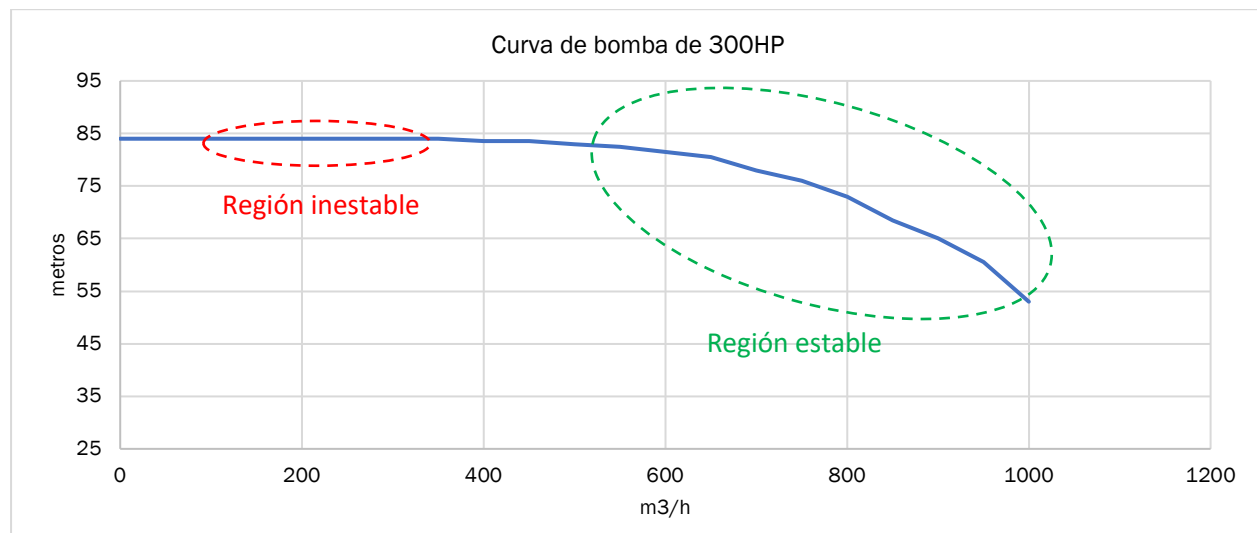


Figura 51. Curva de bomba centrífuga de 300hp.

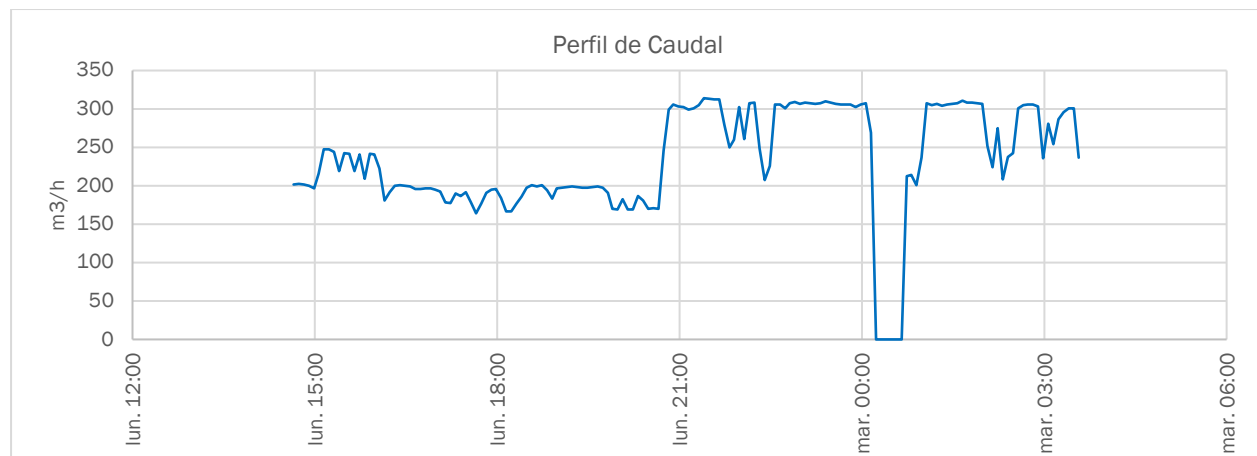
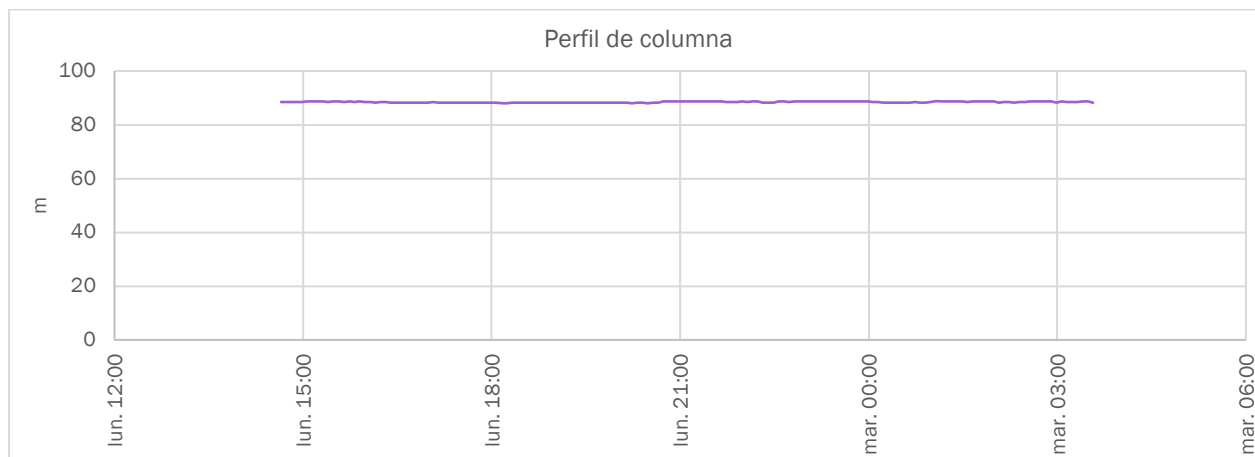
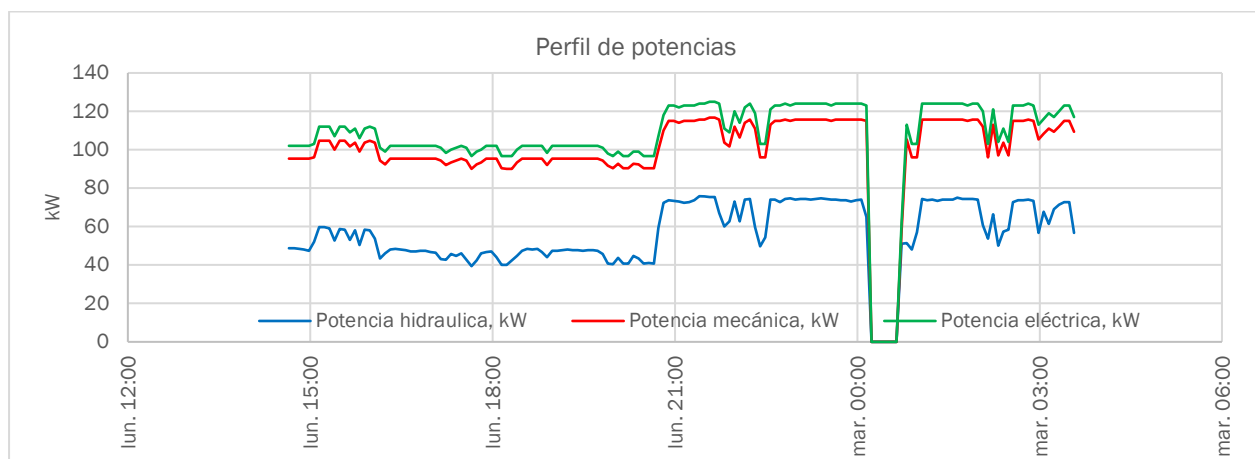


Figura 52. Perfil de caudal de la bomba.

A pesar de que el caudal medido varía considerablemente, la columna, mostrada en la Figura 53, cambia solamente ligeramente.



El comportamiento variable del caudal se reflejó también en la medición de potencia eléctrica en la alimentación del motor eléctrico de la unidad de bombeo.



La bomba está operando en una región de eficiencia pobre. En la Figura 51 se muestra que la zona recomendada de operación para esta bomba en particular es donde la curva tiene mayor pendiente, en donde cambios ligeros en la columna tendrán cambios ligeros en el caudal.

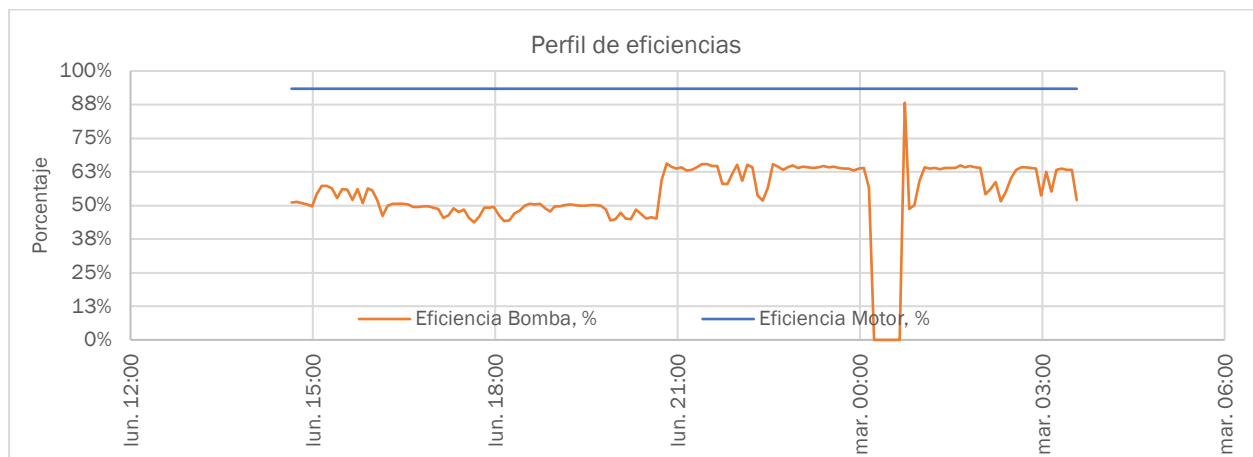


Figura 55. Perfiles de eficiencia de conversión de energía del motor y de la bomba.

A partir de este análisis, se concluyen que la bomba instalada en este sitio no es la adecuada para esta aplicación (de acuerdo con los alcances del análisis hecho en este documento), existen otros factores adicionales no relacionados con la eficiencia energética que se recomendaría evaluar para tomar una decisión contundente.

Existe un beneficio económico de reemplazar esta bomba por una bomba cuya curva sea adecuada para las condiciones del sistema hidráulico. Ante un hallazgo como el presente, se recomienda evaluar el reemplazo de la bomba.

Ejemplo de evaluación del control de la operación de bombas en paralelo

Comúnmente, los sistemas hidráulicos cuentan con varias unidades de bombeo operando en paralelo. Esta configuración de unidades de bombeo permite variar el caudal en el sistema, al encender o apagar unidades, dependiendo del requerimiento de caudal del sistema. Sin embargo, la variación del caudal en función de la cantidad de bombas encendidas depende del punto de operación del conjunto de bombas con la curva del sistema.

Existe la posibilidad de que, al encender una bomba adicional resulte en un aumento pequeño en el caudal del sistema. Para estimar los parámetros de caudal y columna con varias unidades encendidas, se recomienda obtener la curva del sistema, realizando mediciones de caudal y cálculos de columna. Este ejemplo considera este caso en un sitio industrial.

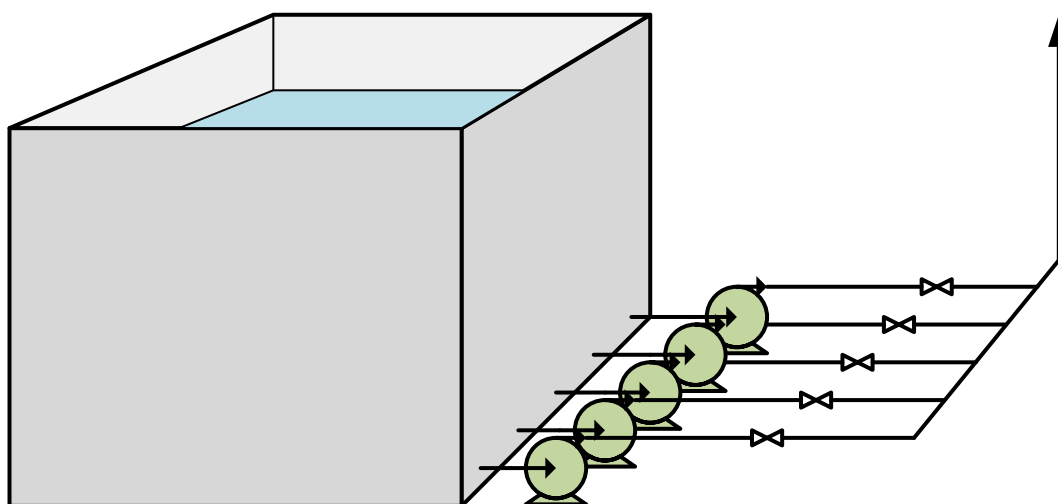


Figura 56. Sistema hidráulico con 5 bombas en paralelo.

Un sistema de cinco unidades de bombeo en paralelo fue evaluado en un sitio industrial. Cada bomba fue medida en su caudal, su columna y su potencia eléctrica. Los valores promedio medidos son los indicados en la tabla siguiente. Adicionalmente, se conoce la curva de las bombas. En este sistema, las cinco bombas son la misma marca y modelo.

Tabla 4. Valores de caudal y columna medidos por bomba.

Unidad	Caudal, m ³ /h	Columna, metros	Potencia eléctrica, kW
Pump 01	500	72	148
Pump 02	520	72	161
Pump 03	514	73	151
Pump 04	548	71	160
Pump 05	498	72	159
SUM	2,580		779

Observe que las bombas operan en un caudal similar; las diferencias pueden ser resultado de cierto error en las mediciones y/o de variaciones en los impulsores de dichas bombas por deterioro. Asimismo, la columna es prácticamente la misma para las cinco bombas, debido a que todas descargan a la misma tubería colectora.

Tomando en consideración la curva de las bombas, el caudal total del sistema con las cinco bombas encendidas y la columna del sistema, se construye la curva del sistema. La curva considera que existe una columna hidrostática, por la torre de enfriamiento no ilustrada en la Figura 56.

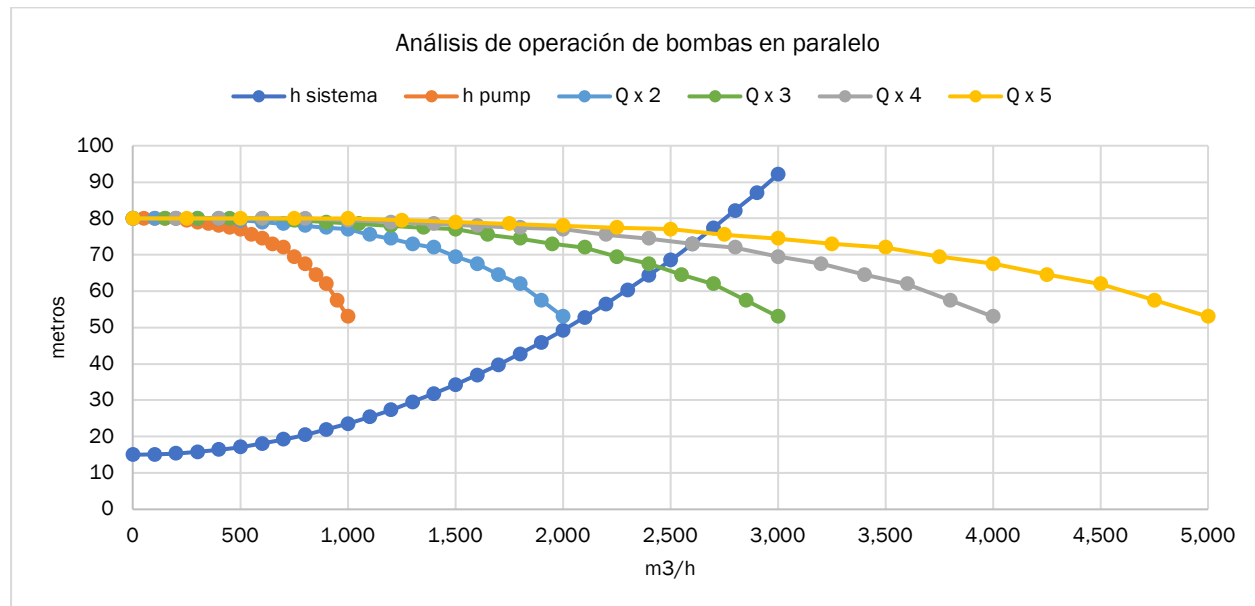


Figura 57. Análisis de operación de bombas en paralelo.

Observe en la Figura 57 las curvas de las bombas en paralelo. Para dicho sistema, una o dos bombas no son suficientes para causar un caudal en el sistema, debido a que las curvas de una bomba y de dos bombas no se cruzan con la curva del sistema. Este sistema se debe de operar con tres bombas cuando menos.

Por otro lado, operar con cuatro o cinco bombas resulta en una diferencia muy pequeña en el caudal, pero sí tiene un impacto considerable en el uso de energía eléctrica total del conjunto de bombas.

En este sistema se recomienda realizar pruebas para demostrar que las premisas descritas son correctas y que el flujo total del sistema con cuatro bombas operando es suficiente para cubrir el requerimiento del proceso industrial que alimenta.

Cabe mencionar que el beneficio en ahorro de energía por operar este sistema con cuatro bombas en contraste a operarlo con cinco bombas no es directamente el valor de la potencia de la bomba que se apagará, indicada en la Tabla 4, debido a que el punto de operación cambiará en caudal, columna y eficiencia para todas las bombas.

Palabras finales

Los ejemplos plasmados en este documento, junto con sus conclusiones y recomendaciones, son resultado de la experiencia de los especialistas de NRGY Solutions. Consideramos que el análisis energético de sistemas de bombeo añade un gran valor a las auditorías energéticas y brinda de resultados que son muy difíciles o imposibles de obtener si no se conocen los fundamentos de análisis, las mediciones en campo o la combinación de ambos.

Si este tema es de interés para usted o Ud. tiene necesidad de que se realice un análisis de sus sistemas de bombeo, no dude en contactarnos en info@nrgysolutions.mx.

Lista de figuras

Figura 1. Sistema de bombeo abierto.....	5
Figura 2. Sistema de bombeo cerrado.....	6
Figura 3. Ejemplo de sistema de bombeo industrial.....	6
Figura 4. Diagrama de una unidad motor-bomba.....	7
Figura 6. Curva de bomba (TACO 2009D a 1760 RPM). Tomada de TACO.	10
Figura 7. Sistema de bombeo industrial y curva de bomba (azul) y sistema (rojo).	12
Figura 8. Curva del sistema (color rojo) sobrepuesta en la curva de la bomba. Tomada de TACO.....	13
Figura 9. Esquema general de medición de parámetros relevantes en sitio.....	15
Figura 10. Limpieza de pintura de la tubería con una carda.	17
Figura 11. Medición del grosor de la tubería con medidor de grosor por ultrasonido.	17
Figura 12. Configuración de medidor de caudal con ultrasonido.....	18
Figura 13. Medición de caudal con ultrasonido.....	18
Figura 14. Medición instantánea de caudal de agua en una tubería.....	19
Figura 15. Transductores de presión manométrica en descarga y succión de una bomba.	20
Figura 16. Medición de presión en el cabezal principal de descarga de varias bombas en paralelo..	20
Figura 17. Medición de presión y caudal de una bomba.	21
Figura 18. Pantalla de la función de Motor Analyzer del FLUKE 438.....	23
Figura 19. Auditora de energía realizando medición eléctrica de una unidad de bombeo con un medidor eléctrico trifásico DENT ELITE PRO XC.	23
Figura 20. Instalación de medidores eléctricos en alimentador eléctrico del motor de bomba. FLUKE 438 y METREL MI2892.....	24
Figura 21. Analizadores eléctricos FLUKE 438 y HIOKI PQ3198 en la alimentación eléctrica de un motor.	24
Figura 22. Diagrama de instalación de sistema de bombeo con bomba de tipo turbina vertical.....	26
Figura 23. Perfil de nivel del tanque de alimentación de una VTP.	27
Figura 24. Perfil de presión manométrica medida a la descarga de la VTP.	27
Figura 25. Perfil de columna desarrollada por la VTP.....	28
Figura 26. Perfil de caudal medido de la VTP.....	28
Figura 27. Perfil de kW eléctricos medidos y kW hidráulicos calculados de la VTP.	29
Figura 28. Perfil de eficiencia calculada de la bomba, tomando en consideración $\eta_{motor} = 95\%$. .	29
Figura 29. Diagrama de instalación de sistema de bombeo con bomba de tipo Split case.....	30
Figura 30. Perfil de presión manométrica medida a la succión y descarga de una bomba Split case.	30
Figura 31. Perfil de columna desarrollada por la bomba Split case.....	31
Figura 32. Perfil de caudal medido en la bomba Split case.....	31
Figura 33. Perfil de kW eléctricos medidos y kW hidráulicos calculados de la bomba Split case.	32
Figura 34. Perfil de eficiencia calculada de la bomba, tomando en consideración $\eta_{motor} = 95\%$. .	32
Figura 35. Dos tipos de pozos profundos de extracción de agua.	33
Figura 36. Sonda para medición de nivel dinámico. Marca Allegiance. Fotografía propiedad de Allegiance.	34
Figura 37. Perfil de presión manométrica en el Punto 02 y caudal de la bomba.	36
Figura 38. Perfil de columna desarrollada por la bomba, evaluada entre Punto 01 y Punto 02.	36
Figura 39. Perfil de kW eléctricos medidos y kW hidráulicos calculados de la bomba.....	36
Figura 40. Perfil de eficiencia calculada de la bomba, tomando en consideración $\eta_{motor} = 95\%$. .	37

Figura 41. Instalación típica de bomba centrífuga (se incluyen instrumentos de medición para la evaluación).....	38
Figura 42. Bombas centrífugas de aplicación general en industria.	39
Figura 43. Perfiles de presión a la succión y a la descarga de la bomba.	39
Figura 44. Perfil del caudal de la bomba.	40
Figura 45. Perfil de la columna desarrollada por la bomba.	40
Figura 46. Perfiles de potencia hidráulica, mecánica y eléctrica de la unidad de bombeo.....	41
Figura 47. Perfiles de eficiencia de la bomba y del motor eléctrico.....	41
Figura 48. Bomba centrífuga (izquierda) con válvula de estrangulación para reducción del caudal. .	42
Figura 49. Cambio en la curva del sistema al estrangular el flujo con una válvula.	42
Figura 50. Comparación de métodos de control de caudal en un sistema hidráulico.	43
Figura 51. Análisis de mejora por uso de VFD como reemplazo de una válvula de estrangulación....	44
Figura 52. Curva de bomba centrífuga de 300hp.....	46
Figura 53. Perfil de caudal de la bomba.....	46
Figura 54. Perfil de columna desarrollada por la bomba.	47
Figura 55. Perfiles de potencia de la unidad de bombeo.....	47
Figura 56. Perfiles de eficiencia de conversión de energía del motor y de la bomba.....	48
Figura 57. Sistema hidráulico con 5 bombas en paralelo.....	49
Figura 58. Análisis de operación de bombas en paralelo.	50

Lista de tablas

Tabla 1. Herramienta recomendada para medición de caudal.	16
Tabla 2. Herramienta recomendada para medición de presión.	20
Tabla 3. Herramienta recomendada para medición de potencia eléctrica.....	22
Tabla 4. Valores de caudal y columna medidos por bomba.....	49



www.nrgysolutions.mx

©2023