



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diagnostico energético de
equipos de bombeo de agua
en zonas rurales**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Edward Albores Castro

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Eduardo Medina Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

AGRADECIMIENTOS

“A Jehová daré gracias en gran manera con mi boca”- Salmos 109:30.
Por brindarme apoyo y resistencia en los momentos cuando dudé hasta de mí mismo y haberme auxiliado para alcanzar esta meta.

A mis padres, Santos Albores Sánchez y Manuela Castro García por todo su cariño y amor, mucho más al haberme apoyado incondicionalmente durante toda mi carrera desde la infancia hasta el término de este proyecto. Muchas gracias padres.

A mi hermano, Kevin Albores Castro por mostrarme su apoyo y comprensión al haberme cubierto la espalda cuando estuve ausente.

A toda mi familia, en especial mis tíos Joaquín Castro, Raimunda Castro, Leticia Martínez y Carmela López (difunta) por su apoyo y cariño brindado.

A mi novia Nadia Carolina Barajas Sánchez por haberme apoyado en momentos difíciles durante el final de mi carrera, todo su cariño, amor, ternura, apoyo y comprensión

A mis pocos amigos que me permito contar con los dedos quienes siempre me apoyaron y me dieron aliento durante las etapas más difíciles junto con las desveladas.

A mi asesor y amigo, Eduardo Medina por haberme mostrado el valor de una amistad, su paciencia y disposición en la elaboración de este material.

A la Facultad de Ingeniería por la formación que me permitió concebir dentro de sus aulas.

A la UNAM por permitirme ser su alumno y haber tenido una formación universal, humanista e integral.

Por último, no menos importante, a la DGPA por el apoyo económico brindado mediante el proyecto PAPIME con clave PE102415 y esta TESIS.

Índice

1. Capítulo 1	9
1.1. Introducción	10
1.2. Evolución Histórica	11
1.3. Descripción General de las Bombas	12
1.4. Bombas Rotodinámicas (BR).	12
1.4.1. Bombas Centrífugas.....	14
1.4.2. BR de Pozo Profundo.	16
1.5. Ecuaciones del Bombeo Hidráulico.....	17
1.5.1. Ecuación de Continuidad.....	17
1.5.2. Ecuación de Cantidad de Movimiento.....	18
1.5.3. Ecuación de la Energía.	18
1.6. Principios y/o Conceptos del Bombeo Hidráulico.....	19
1.7. Aspectos generales sobre operación de sistemas de bombeo.	28
2. Capítulo 2	32
2.1. Planteamiento del Problema.	33
2.2. Instrumentación Requerida.	36
2.2.1. Equipos Eléctricos.	36
2.2.2. Equipos Hidráulicos.....	37
2.3. Instalación de Equipo de Monitoreo.	40

3. Capítulo 3	46
3.1. Registro de Campo.....	47
3.2. Análisis de Datos de Fabricante.....	48
3.3. Análisis del Registro de Monitoreo	49
3.4. Análisis de Resultados	52
3.5. Propuesta.....	57
3.6. Análisis económico.....	61
4. Capítulo 4	63
4.1. Conclusiones	64
Bibliografía	67

Tablas

Tabla 1-1.- Evolución de la cobertura nacional de agua potable (CONAGUA, 2009).....	10
Tabla 1-2.- Valores de K para distintos accesorios (SAGARPA, 2012).....	22
Tabla 2-1.- Características actuales de bombas en uso	35
Tabla 3-1.- Datos de monitoreo.....	47
Tabla 3-2.- Datos de placa de bomba	48
Tabla 3-3.- Parámetros complementarios.....	50
Tabla 3-4.- Características de la bomba pozo 4.....	51
Tabla 3-5.- NPSH requerido y disponible	55
Tabla 3-6.- Consumos de energía.....	56
Tabla 3-7.- Características de operación de nueva bomba	60
Tabla 3-8.- Análisis de operación.....	60
Tabla 4-1.- REEB	66

Figuras

Figura 1-1.-Esquema de bomba centrífuga.....	13
Figura 1-2.- Diagrama de clasificación de bombas Centrifugas	13
Figura 1-3.- Bomba con corte longitudinal.	15
Figura 1-4.- Bomba sumergible con motor húmedo.....	16
Figura 1-5.- Bombas sumergibles, motor seco y húmedo.	17
Figura 1-6.- Altura de impulsión	20
Figura 1-7.- Gasto de fluido medido experimentalmente.....	20
Figura 1-8.- Efectos de cavitación de impulsión.	21
Figura 1-9.- Curva característica de operación.....	21
Figura 1-10.- Curva de sistema	23
Figura 1-11.- Intersección de curvas de sistema y operación.....	24
Figura 1-12.- Nivel Dinámico y Nivel Estático.....	26
Figura 1-13.- Sumergencia mínima	27
Figura 1-14.- Curvas por estrangulamiento de gasto.....	29
Figura 1-15.- Demanda variable en un día de operación.....	29
Figura 1-16.- Tipos de controles	31
Figura 2-1.- Situación geográfica	33
Figura 2-2.- Distribución de bombas de agua potable.....	34

Figura 2-3.- Aditamento de inyección de aire	39
Figura 2-4.- Instrumento regulador de presión con sifón	39
Figura 2-5.- Toma termográfica	40
Figura 2-6.- Instalación de Analizador de redes.....	41
Figura 2-7.- Instalación de transductores TS-01de medidor de flujo ultrasónico	41
Figura 2-8.- Señales de sensibilidad de medidor de flujos líquidos	42
Figura 2-9.- Diagrama de instalación de manómetro de descarga	42
Figura 2-10.- Toma fotográfica de instalación real de manómetro de descarga.	43
Figura 2-11.- Diagrama de instalación de manómetro de succión (NE y ND)	43
Figura 2-12.- Toma fotográfica de instalación real de manómetro de descarga.	44
Figura 2-13.- Software operador de manómetros.....	44
Figura 3-1.- Monitoreo de consumo eléctrico	48
Figura 3-2.- Curvas H-Q, eficiencia-Q y NPSH-Q	49
Figura 3-3.- Curva del sistema	52
Figura 3-4.- Operación de bomba.....	52
Figura 3-5.- Zona de interés	53
Figura 3-6.- Eficiencia de operación	54
Figura 3-7.- Tarifa 6 de CFE, para sistemas de bombeo público.	56
Figura 3-8.- Curvas características de bomba propuesta.....	58

Figura 3-9.- Curvas características de bomba propuesta.....	59
Figura 3-10.- Consumo de la bomba propuesta.....	62
Figura 3-11.- Muestra de envío de bomba.....	62

Nomenclatura

Carga dinámica total	H_{DT}	[m], [ft]
Carga de bombeo	H_B	[m], [ft]
Coefficiente de fricción	f	[adim]
Coefficiente de pérdidas por accesorios	k_i	[adim]
Densidad	ρ	[kg/m ³]
Diámetro	D	[m,mm]
Eficiencia	η	[%]
Etapas	z_p	[adim]
Factor de fricción de Colebrook-White	f_{cw}	[adim]
Factor de fricción de Swamee-Jain	f_{sj}	[adim]
Gasto o flujo volumétrico	Q	[GPM, m ³ /min]
Longitud de tubería	L	[m, ft]
Nivel de succión	Z	[m]
Nivel Dinámico	ND	[m]
Nivel Estático	NE	[m]
Pérdida de carga de Darcy-Weisbach	h_{DW}	[m, ft]
Pérdidas de carga por fricción	h_f, h_p	[m, ft]
Peso específico	γ	[N/m ³]
Presión	P	[kPa, psi, kg/cm ²]
Relación de eficiencia energética de bombeo	REEB	[GPM/kW]
Régimen de giro	n	[rpm]
Reynolds	Re	[adim]
Rugosidad Absoluta	ϵ	[mm, m]
Superficie o área	S	[m ²]
Temperatura	T	[°C]
Tiempo	t	[s, min, h]
Velocidad	V, Vel	[m/s]
Viscosidad cinemática	ν_c	[m ² /s]
Viscosidad dinámica	μ	[kg/m · s]
Volumen	V, Vol	[m ³]

Resumen.

En el presente trabajo se realizó una evaluación energética de equipos de bombeo de un sistema de agua municipal en el sur de la República Mexicana. La evaluación tuvo como objetivo principal conocer el estado en el que se encuentran los equipos, identificando oportunidades de ahorro de energía.

A fin de lograr ese objetivo, se realizó una inspección física ocular del conjunto e instalación y de esa forma conocer el estado físico en que opera la bomba, también sirvió para ubicar los puntos en donde se colocaría el equipo de medición mismo que posteriormente se instaló en esos puntos.

La información obtenida del monitoreo se descargó en hojas de cálculo para su utilización en la determinación y generación de la curva del sistema, su evaluación de eficiencia y el análisis de cavitación. Así mismo se requería la información técnica del equipo de bombeo, por lo que se tuvo que realizar una búsqueda a fin de encontrar las curvas características de la bomba.

Del análisis de los resultados obtenidos, se encontró que el equipo de bombeo resultó en malas condiciones tanto de operación, como de estado físico, por lo que la recomendación brindada fue el remplazo del equipo de bombeo. Cabe destacar que el proceso de evaluación energética de la localidad comprendía la evaluación de siete bombas de características similares, esto es, todas ellas de pozo profundo. En esta tesis sólo se presenta el proceso de evaluación energética, punto de operación y cavitación para una de las siete bombas.

La recomendación realizada para el equipo nuevo, se basó en las especificaciones que se tenían en la localidad tanto de gasto como carga. Con el fin de garantizar las condiciones de operación con el nuevo equipo, se realizaron nuevamente los análisis de eficiencia mecánica y energética, así como el de cavitación en este equipo.

Objetivo General.

Este trabajo tiene por objetivo principal plantear una metodología para realizar una evaluación energética en bombas de pozo profundo. Así mismo generar un programa mediante Excel, el cual permita realizar una pre-evaluación energética con pocos parámetros.

La evaluación energética que se plantea en este proyecto pretende hallar algunas oportunidades de ahorro de energía dentro de un sistema de bombeo de pozo profundo. Se espera que, con la evaluación de eficiencia energética realizada durante el proyecto, se estén dando algunas recomendaciones con las cuales sea posible lograr un ahorro económico considerable.

En el caso de no ser necesario tomar la medida drástica de remplazo de equipo será necesario tomar otras medidas de ahorro. Así mismo considerar el seguimiento que se le dará a la institución en donde se realiza la evaluación energética.

Alcances.

La evaluación de ahorro y uso eficiente de la energía considerado en este proyecto se limita únicamente al análisis hidráulico del equipo de bombeo de pozo profundo. Partiendo de esta delimitación marcada se estarán tomando pautas para solo realizar el enfoque de cálculo de parámetros hidráulicos partiendo del supuesto de que ya se cuenta con parámetros eléctricos como eficiencia eléctrica del motor, potencia eléctrica, entre otros.

Nuevamente recalcando que a pesar de que la evaluación energética contempla el análisis de todos los equipos (conjunto motor bomba instalada), es esta tesis solo se realiza la evaluación de un sólo equipo de bombeo.

La evaluación energética pretende lograr ahorros de energía que se traduzcan en ahorros monetarios.

CAPÍTULO 1

In fide publica consilia et artis

1.1.Introducción

En algunas zonas rurales y marginadas de la república mexicana no se cuenta con el adecuado suministro de agua potable. Cabe mencionar que, aunque se hayan logrado algunos avances en este sentido, aun así, existen deficiencias que se pueden mitigar. En la Tabla 1-1 mostrada a continuación se ejemplifican los avances y desarrollos de la cobertura de sistemas de bombeo de agua en la República Mexicana:

Tabla 1-1.- Evolución de la cobertura nacional de agua potable (CONAGUA, 2009)

<i>Año</i>	<i>Porcentaje de cobertura</i>		
	<i>Nacional</i>	<i>Zonas urbanas</i>	<i>Zonas rurales</i>
1990	78.40	89.40	51.20
1995	84.60	92.90	61.40
2000	87.90	94.60	68.00
2005	89.20	95.00	70.70
2005 *	89.50	95.20	71.50
2006 *	89.60	95.10	72.30
2007*	89.90	94.50	74.70
2008*	90.30	94.30	76.80
ODM	89.20	94.70	75.60

Por definición, eficiencia energética se denomina a “todas las acciones que conllevan a una reducción económicamente viable de la cantidad de energía necesaria para satisfacer las necesidades energéticas de los servicios y bienes que requiere la sociedad, asegurando un nivel de calidad igual o superior y una disminución de los impactos ambientales negativos derivados de la generación, distribución y consumo de energía” (SENER, 2016). Desde ese punto de vista se puede deducir que la eficiencia energética consiste en cumplir los requerimientos de la localidad, aunque en algunos casos esto implique la renovación del equipo de bombeo.

Con el fin de darle el mejor uso a la energía, se deben realizar evaluaciones energéticas en las cuales primeramente se tiene que realizar una inspección física y de ese modo tener una primera impresión sobre la instalación completa para ubicar los sitios en

donde se realizarán las mediciones de parámetros eléctricos e hidráulicos; y posteriormente realizar un análisis entre parámetros característicos y parámetros de medición con el fin de conocer el funcionamiento del equipo de bombeo.

En los casos en que el equipo de bombeo no brinda el suficiente gasto durante el bombeo o esté deteriorada la bomba, se tiene que realizar un estudio de monitoreo, del cual, partiendo de los datos de operación, ayude a sugerir un nuevo equipo de bombeo que proporcione el gasto o cantidad de líquido requerido.

Si bien el propósito es realizar una evaluación de eficiencia energética sobre el equipo de bombeo, y por otro lado un análisis de cavitación para lo cual surge el parámetro NPSH (Net Positive Suction Head), que “está relacionado con el fenómeno de la cavitación y es una característica para determinar si la bomba seleccionada es apta para operar en la planta contemplada o no lo es.” (LEDERLE Hermetic, 2010)

Con este fin al realizar el análisis de operación eficiente de la máquina, debe existir un punto de comparación con los datos de operación especificados por el proveedor. Por lo cual se deberán conocer si el equipo no opera bajo el régimen especificados por el proveedor, se tendrá que ajustar el equipo a este punto mediante estrangulación de gasto, variadores de frecuencia, etc., aun así, en algunos casos el llevar la bomba al punto óptimo o BEP no siempre implicaría ser la mejor opción. Pues dependiendo lo que se quiera lograr se pueden sacrificar variables como gasto, o carga.

1.2.Evolución Histórica

El transporte de líquidos ha tenido vital importancia desde el asentamiento del hombre, pues el agua es utilizada en la gran mayoría de tareas que realiza el ser humano; algunas de éstas van desde las más simples como las del hogar hasta otras con mayor grado de complejidad como es su uso en procesos industriales.

La primera bomba conocida fue descrita por Arquímedes en el siglo III A.C y se conoce como tornillo de Arquímedes, aunque este sistema había sido utilizado anteriormente por Senaquerib, rey de Asiria en el siglo VII A.C. Formalmente en el siglo

XII, el árabe Al-Jazari en “El libro del conocimiento de los ingeniosos mecanismos” (RUNSA, 2008), describió e ilustró diferentes tipos de bombas, incluyendo bombas reversibles, bombas de doble acción, bombas de vacío, bombas de agua y otras bombas de desplazamiento positivo.

Con este antecedente en la historia se da cuenta de que desde siempre se ha tenido que transportar el vital líquido. Es evidente que es muy importante el análisis de los diferentes tipos de bombas disponibles para transporte de todo tipo de líquidos, incluido el agua.

1.3.Descripción General de las Bombas

Por definición una bomba es un convertidor de la energía mecánica procedente de un motor, en energía hidráulica normalmente en forma de energía cinética y presión.

Ahora bien, existen diversos criterios para clasificar a las bombas y estos van desde considerar el material del que están hechos, aplicaciones hasta aquellas basadas en su configuración mecánica. Principalmente existen dos grupos que pueden llegar a ser clasificados debido a la forma de adición de energía al fluido:

- Bombas de Desplazamiento Positivo (BDP): El flujo entregado va desde pulsátil o alternativo a continuo, dependiendo del tipo de bomba
- Bombas Rotodinámicas (BD): El flujo entregado es continuo.

1.4.Bombas Rotodinámicas (BR).

Este tipo de bombas basan su funcionamiento en la ecuación de Euler. El elemento transmisor de energía es el llamado rodete o impulsor, dicho elemento transforma energía mecánica del impulsor en energía de velocidad al fluido (dinámica centrífuga en el fluido), de ahí que el nombre de estas sea rotodinámicas o centrífugas. La Figura 1-1 muestra una idea sobre los componentes y funcionamiento de una bomba centrífuga.

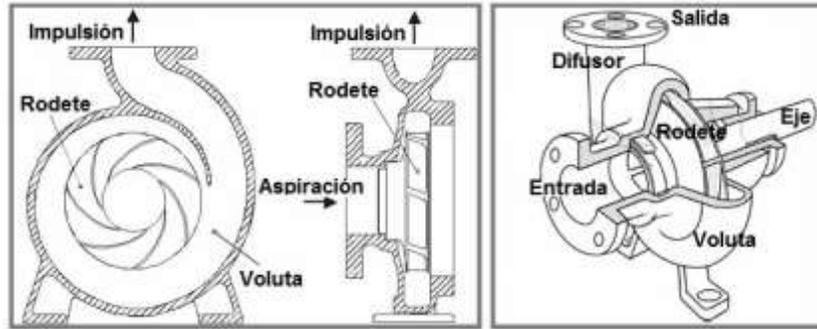


Figura 1-1.-Esquema de bomba centrífuga.

Este tipo de bombas son las mejores en cuanto al bombeo de fluidos de baja viscosidad; si bien este tipo de bombas tiene la capacidad de impulsar líquidos con sólidos en suspensión (siempre y cuando estos posean diámetros relativamente pequeños). Estas pueden ser de una o varias etapas en las cuales se manejan presiones relativamente pequeñas de hasta 5 atm por etapa e incluso llegando a alcanzar 25 atm dependiendo el número de etapas.

La clasificación más común para este tipo de bombas es la que comienza separando las bombas rotodinámicas por la dirección del flujo, tipo de succión, posición del eje, número de etapas, tipo de difusor, tipo de carcasa, etc. Debido a que existe una gama bastante amplia en que pueden clasificarse, a continuación en la figura 1-2 se pretende mostrar una clasificación de este tipo de bombas.

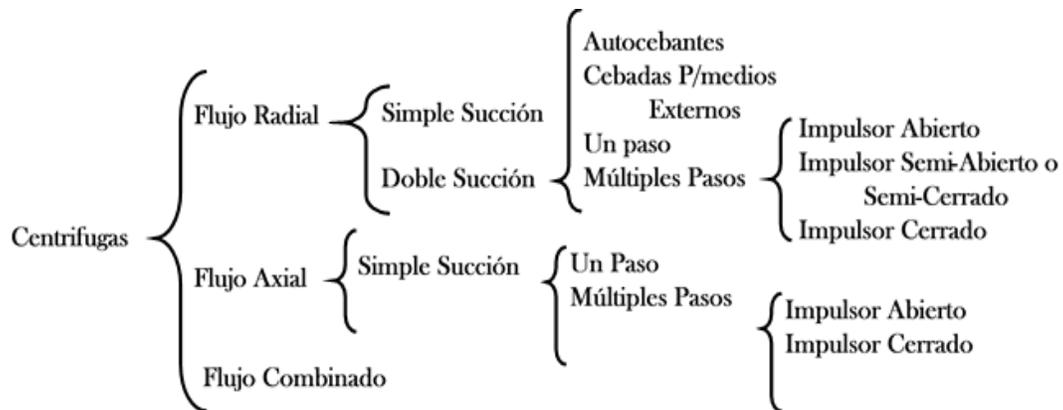


Figura 1-2.- Diagrama de clasificación de bombas Centrifugas

A continuación, se describen brevemente las bombas de interés.

1.4.1. Bombas Centrífugas.

Una bomba centrífuga es una máquina que consiste de un rotor con un conjunto de álabes encerrado dentro de una carcasa (cárter cubierta o coraza). Se denominan así porque la delta de presión que crean es ampliamente atribuible a la acción centrífuga.

Este tipo de bombas son comúnmente conocidas por poseer los siguientes elementos:

- Φ Carcasa: Es la parte exterior protectora de la bomba y cumple la función de convertir la energía de velocidad impartida al líquido por el impulsor en energía de presión; esto es realizable gracias a la reducción de la velocidad por un aumento gradual del área.
- Φ Impulsor: Es el corazón de la bomba. Recibe el líquido y le imparte una velocidad de la cual depende la carga producida por la bomba.
- Φ 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.
- Φ Estoperos, empaques y sellos: la función de estos elementos es evitar el flujo hacia fuera del líquido bombeado a través del orificio por donde pasa la flecha de la bomba y el flujo de aire hacia el interior de la bomba.
- Φ Flecha: Es el eje de todos los elementos que giran en la bomba centrífuga, transmitiendo además el movimiento que imparte la flecha del motor.
- Φ Cojinetes: Sirven de soporte a la flecha de todo el rotor en un alineamiento correcto en relación con las partes estacionarias. Soportan las cargas radiales y axiales existentes en la bomba.
- Φ Bases: Sirven de soporte a la bomba, sosteniendo el peso de toda ella.

En la figura 1-3 se puede observar el diagrama de una bomba con corte longitudinal y nombre sobre cada una de sus partes.

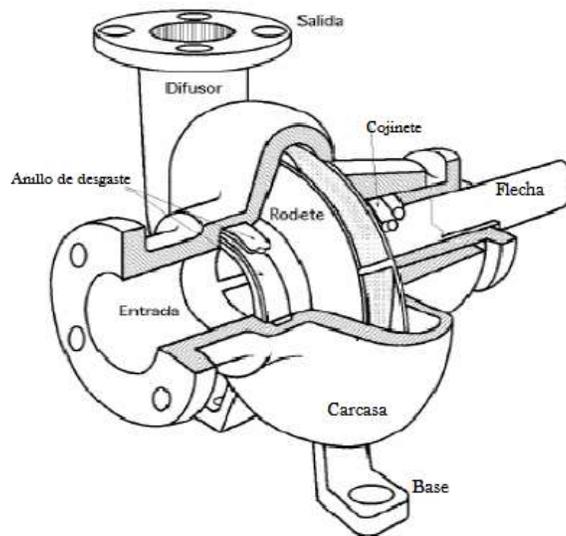


Figura 1-3.- Bomba con corte longitudinal.

Ahora bien, las bombas centrífugas pueden ser subdivididas en tres grupos según el tipo de impulsor que posea, o bien según la dirección del fluido.

- Bombas Centrífugas de Flujo Radial: Comúnmente utilizadas para cargas altas y caudales pequeños, sus impulsores son por lo general angostos. El movimiento del fluido se inicia en un plano paralelo al eje de giro del impulsor de la bomba y termina en un plano perpendicular a éste.
- Bombas Centrífugas de Flujo Axial: Estas bombas se utilizan para cargas pequeñas y grandes caudales, tienen impulsores tipo propela, de flujo completamente axial.
- Bombas Centrífugas de Flujo Diagonal o mixto: Estas bombas se utilizan para cargas y caudales intermedios. La energía se pasa al líquido mediante la acción de la fuerza centrífuga y la impulsión ejercida por los álabes.

Así mismo al realizar una clasificación según el tipo de succión que posea será:

- Bombas centrífugas de succión simple: Refiere a bombas que poseen uno o más impulsores de succión simple.
- Bombas Centrífugas de succión doble: Refiere a bombas que poseen uno o más impulsores de succión doble.

1.4.2. BR de Pozo Profundo.

Para el bombeo de aguas bajo el nivel del suelo se utilizan bombas que se les conoce como bombas de pozo profundo o bombas sumergibles siendo la figura 1-4 un ejemplo de este tipo; a su vez, éstas se dividen en dos grandes grupos: bombas de motor húmedo y bombas de motor seco dependiendo la instalación, como la figura 1-5. En las primeras lo que se hace es acoplar el motor por debajo de la bomba en una atmosfera completamente llena de fluido por lo que se aíslan herméticamente los componentes del motor eléctrico, y del segundo grupo también llamadas bombas verticales en el cual el motor se monta sobre la bomba, sobre el nivel de suelo.



Figura 1-4.- Bomba sumergible con motor húmedo

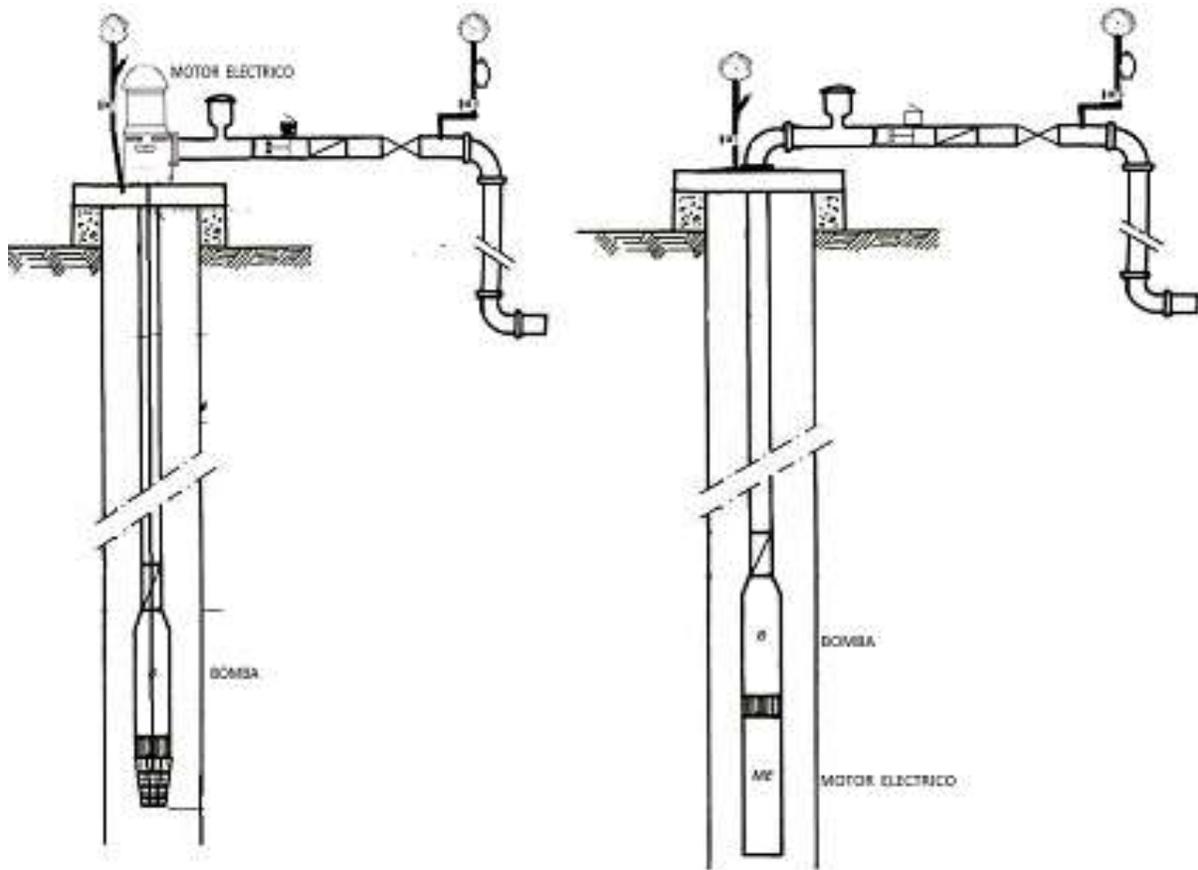


Figura 1-5.- Bombas sumergibles, motor seco y húmedo.

1.5. Ecuaciones del Bombeo Hidráulico

Las ecuaciones que se definen a continuación son los principios básicos de hidráulica que se deben tener en cuenta al realizar una evaluación energético-hidráulica. Estas ecuaciones se obtienen de aplicar la concepción Euleriana a la ley de conservación de masa, segunda ley de Newton y primera ley de la Termodinámica.

1.5.1. Ecuación de Continuidad.

En su forma integral general esta ecuación se describe de acuerdo a la siguiente expresión

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \, dVol + \int_{SC} \rho (\vec{v}_r, d\vec{S}) = 0 \text{ -----1-1}$$

Esta versión de la ecuación de continuidad permite la aplicación de múltiples y eficientes simplificaciones. Por ejemplo, al considerar velocidad uniforme sobre una

superficie, o en tuberías considerar flujo estacionario y velocidad uniforme en la sección transversal por lo que en el conducto la ecuación entre dos puntos se suele simplificar a la siguiente expresión

$$\rho_1 S_1 V_1 = \rho_2 S_2 V_2 \text{ -----1-2}$$

Donde ρ es la densidad, S la superficie o área y V la velocidad en el fluido.

Ahora considerando la Ecuación 1.2 para un fluido incompresible se reduce a la Ecuación 1-3

$$S_1 V_1 = S_2 V_2 = Q \text{ -----1-3}$$

Lo que en realidad representa la cantidad de fluido (gasto Q) a través de una tubería.

1.5.2. Ecuación de Cantidad de Movimiento.

La expresión integral a la ecuación de Momentum o cantidad de movimiento es la Ecuación 1-4

$$\Sigma \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dVol + \int_{SC} \rho \vec{V} (\vec{V}_r, dS_{vec}) \text{ -----1-4}$$

Siendo \vec{V}_r la velocidad relativa del fluido respecto a la superficie de control. Si se aplican las simplificaciones de flujo estacionario e incompresible, así como velocidades medias entre dos puntos, resultaría la Ecuación 1-5

$$\Sigma \vec{F} = \rho Q (\vec{V}_2 - \vec{V}_1) \text{ -----1-5}$$

1.5.3. Ecuación de la Energía.

La forma integral a la ecuación de energía se escribe como la Ecuación 1-6

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} E \rho dVol + \int_{SC} E \rho (\vec{V}_r, d\vec{S}) \text{ -----1-6}$$

Donde Q es el flujo de calor intercambiado, W el trabajo intercambiado con el VC (volumen de control) y E la suma de energías del fluido (interna, cinética y potencial).

Al integrar y dividir la Ecuación 1-6 entre la gravedad g, la ecuación se puede expresar en términos de longitud, mediante la Ecuación 1-7

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - h_p + H_B = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \text{-----1-7}$$

Donde h_p es la energía perdida por rozamiento (pérdidas por carga) y H_B es la energía añadida desde el exterior. Aun se reduce más al hacer teóricamente despreciable las pérdidas por rozamiento en tuberías, por lo que resulta la siguiente expresión

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \text{-----1-8}$$

La Ecuación resultante es conocida como ecuación de Bernoulli, en donde no hay aporte de energía desde el exterior, donde el término $\frac{P}{\rho g}$ es la energía debida a la presión, $\frac{V^2}{2g}$ es la energía cinética y z es la energía potencial respecto a un nivel de referencia. En realidad, la ecuación de Bernoulli se obtiene al integrar las ecuaciones de cantidad de movimiento.

1.6.Principios y/o Conceptos del Bombeo Hidráulico.

Ya habiendo revisado el tipo de bombas que pueden llegar a existir en el mercado y las ecuaciones básicas de conservación hidráulica, compete conocer algunos conceptos que ayudan en el cálculo y selección de la bomba adecuada a las circunstancias requeridas.

- ❖ **Carga Dinámica Total (CDT).** - La carga dinámica total de bombeo se define como la suma total de resistencias del sistema, correspondientes a la carga estática total, a la pérdida de carga por fricción en la tubería de succión y descarga y la carga de velocidad. Se expresa comúnmente en metros de columna de líquido o en bares (presión), se calcula con la Ecuación 1-9. La carga estática incluye el desnivel y el cambio de presión entre los puntos de evaluación. La Figura 6 muestra el desnivel (altura de impulsión)

$$H_B = \left[\frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{\Delta v^2}{2g} + \Delta Z + h \right] \text{-----1-9}$$

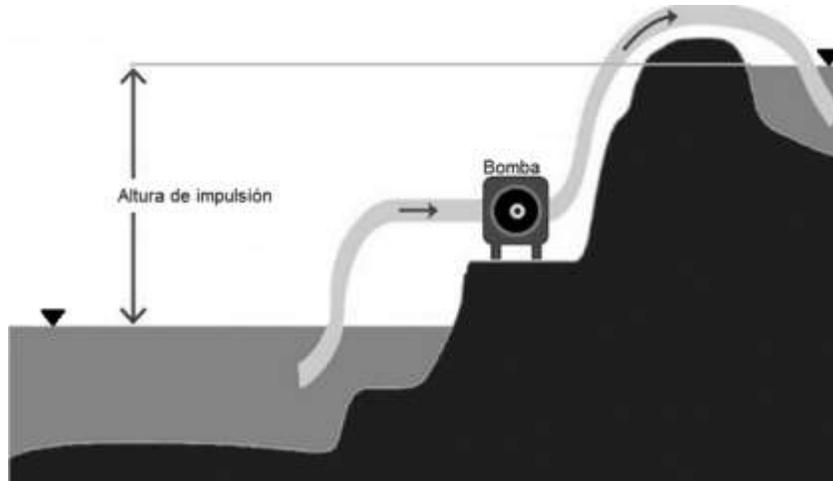


Figura 1-6.- Altura de impulsión

- ❖ **Caudal (Gasto).** - Cantidad de líquido (en volumen) que se bombea trasladada o eleva en un cierto intervalo de tiempo por una bomba como la Figura 1-7 normalmente expresada en litros por segundo (l/s), litros por minuto (l/m) o metros cúbicos por hora (m³/h) mediante la siguiente:

$$Q = \frac{Vol}{t} [l/s] \text{-----1-10}$$

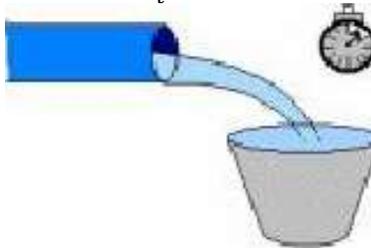


Figura 1-7.- Gasto de fluido medido experimentalmente

- ❖ **Cavitación.** – Es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido fluye a gran velocidad y alcanza la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implosionan produciendo un desprendimiento de metal sobre el impulsor de la bomba como se observa en la Figura 1-8.



Figura 1-8.- Efectos de cavitación de impulsión.

- ❖ **Curvas características.** – Expresión gráfica que explica los puntos de operación de la bomba: el diagrama representa la curva formada por los valores de caudal como variable independiente y de altura de elevación (carga), potencia y eficiencia como variables dependientes como se muestra en la Figura 1-9, indicados con referencia a un determinado tipo de impulsor específico y a un modelo específico de bomba

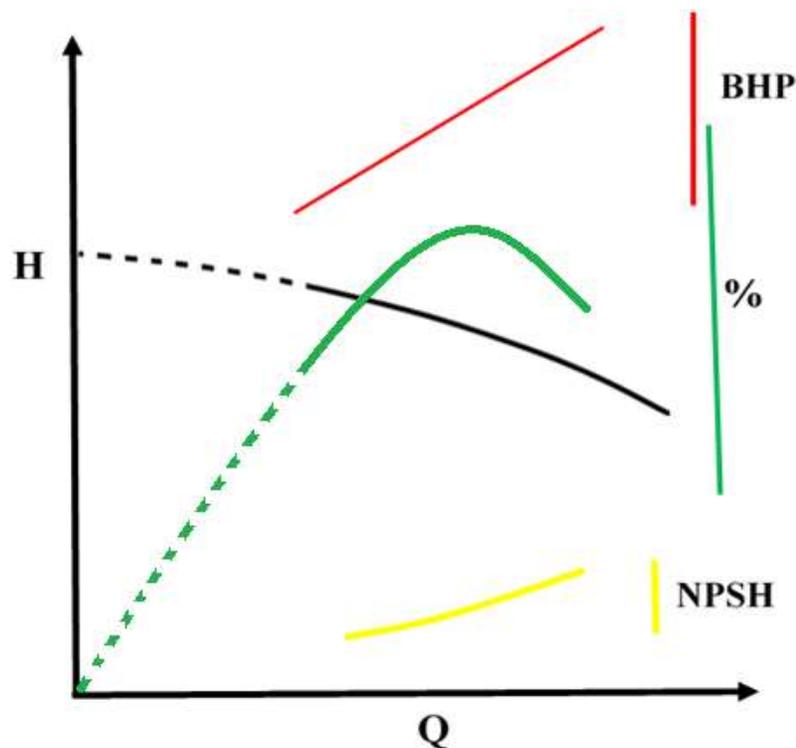


Figura 1-9.- Curva característica de operación

- ❖ **Curva del sistema de bombeo.** – La curva del sistema define las características particulares de un sistema de bombeo. La Ecuación 1-11, describe de manera general su forma

$$H = A + B \times Q^2 \text{ -----1-11}$$

Donde H es la carga, Q es el gasto y A, B son coeficientes; el primero se refiere al cambio en presión en el sistema junto con el cambio en altura, es decir, la carga estática (Ecuación 1-12) y el segundo a las pérdidas por fricción.

$$A = \frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta Z \text{ -----1-12}$$

Para el cálculo del segundo se contempla la sumatoria de pérdidas de fricción y locales de accesorios en cada tramo, por lo que coeficiente B resulta en la Ecuación 1-13

$$B = \sum_{i=1}^m \frac{8 \cdot f_i \cdot L \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} + \sum_{i=1}^m \frac{k_i \cdot v^2 \cdot Q^2}{2 \cdot g} \text{ -----1-13}$$

Donde L es la longitud de tubería y D_{int} es el diámetro interno de la tubería. Los coeficientes k_c y k son valores estándar según el tipo de accesorio. En la Tabla 1-2 se muestran algunos valores de estos parámetros

Tabla 1-2.- Valores de K para distintos accesorios (SAGARPA, 2012)

Accesorio	Coficiente k
1.-De depósito a tubería (pérdida a la entrada)	
Conexión a ras de la pared	0.50
Tubería entrante	1.0
Conexión abocinada	0.05
2.- De tubería a depósito (pérdida a la salida)	1
3.-Contracción brusca	k_c
4.-Codos y tes	
Codo de 45°	0.35 a 0.45
Codo de 90°	0.50 a 0.75
Tes	1.50 a 2.00

Una vez calculados los valores de A y B que involucran a todas las características de un sistema, se genera la curva sistema (Figura 1-10):

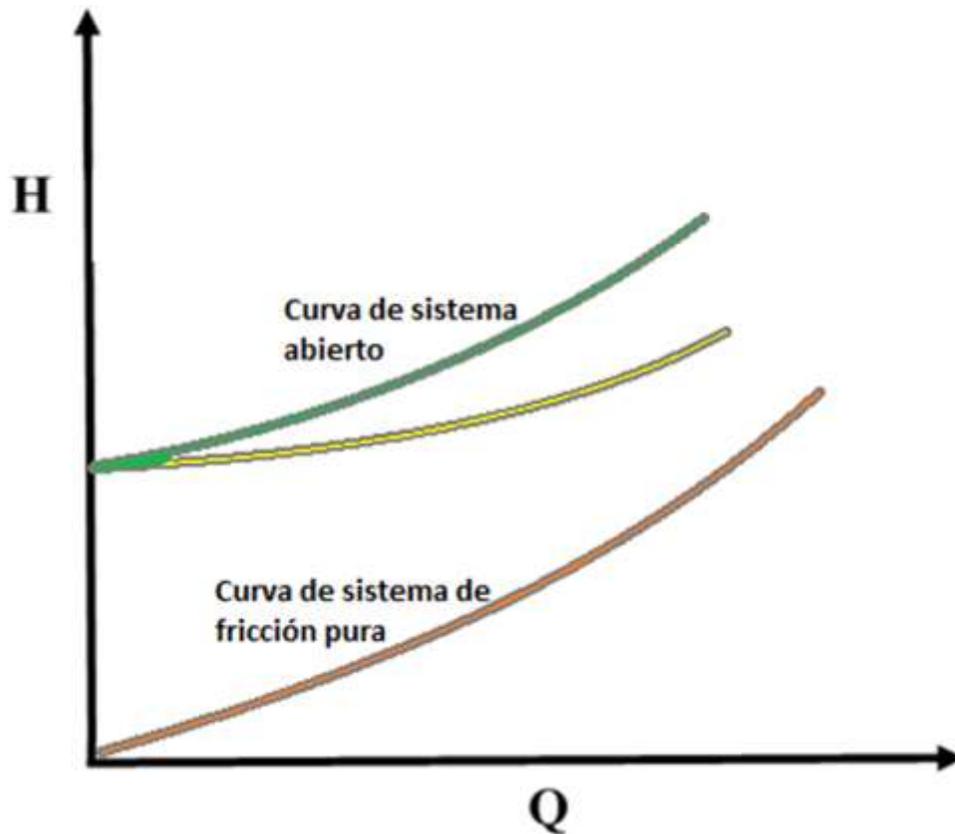


Figura 1-10.- Curva de sistema

Por otro lado, la intersección entre la curva de la bomba y la curva del sistema representa el punto de operación; se desea en todo caso lograr el punto de máxima eficiencia (BEP), tal como se muestra en la Figura 1-11. Si no es posible, es favorable la operación en un rango entre $\pm 5\%$ del valor correspondiente al BEP.

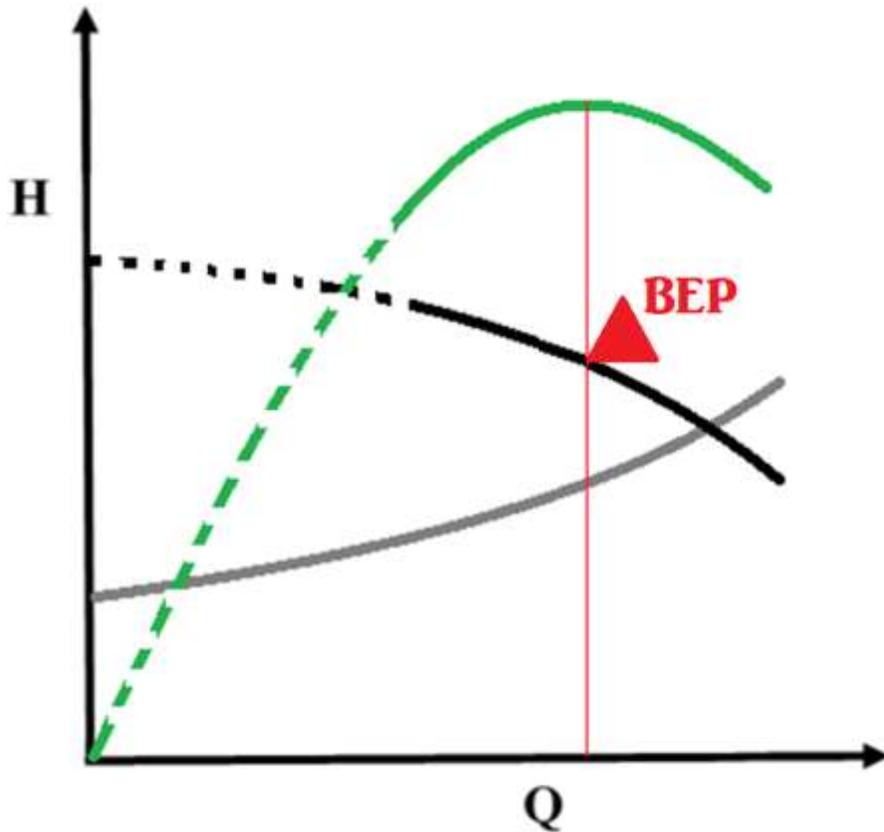


Figura 1-11.- Intersección de curvas de sistema y operación

- ❖ **Ecuación Darcy-Weisbach (1875).** - Es una ecuación ampliamente usada en hidráulica y permite el cálculo de la pérdida de carga debida a la fricción dentro de una tubería llena, Ecuación 1-14

$$h_{D-W} = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \times Q^2 \text{ -----1-14}$$

Donde f es el coeficiente de fricción, L la longitud de tubería vertical, D el diámetro interno y Q es el gasto.

- ❖ **Ecuación de Colebrook-White (1937).** -

En los casos en que el flujo es turbulento se utiliza esta ecuación para el cálculo del factor de fricción; la ecuación de Colebrook-White resulta en la siguiente expresión

$$\frac{1}{\sqrt{f_{cw}}} = -2 \log \left[\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_{sj}}} \right] \text{ -----1-15}$$

Por otro lado, se tiene una simplificación realizada por **Guerrero (1995)** la cual es explícita en función de parámetros de ajuste según sea el valor de Reynolds en la siguiente ecuación:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.71} + \frac{G}{Re^T}\right) \right]^2} \text{-----1-16}$$

Donde G y T son parámetros de ajuste:

G = 4.555	T = 0.8764	Para $4000 \leq Re \leq 10^5$
G = 6.732	T = 0.9104	Para $10^5 \leq Re \leq 3 \cdot 10^6$
G = 8.982	T = 0.93	Para $3 \cdot 10^6 \leq Re \leq 10^8$

❖ **Ecuación de Swamee y Jain (1976).** -

Una ecuación explícita ampliamente utilizada es la Ecuación 1-17

$$f_{sj} = \frac{0.25}{\left[-\log\left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.71} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right) \right]^2} \text{-----1-17}$$

Donde $\frac{\varepsilon}{D}$ es la rugosidad relativa y Re es el Número de Reynolds calculado a partir del diámetro hidráulico.

- ❖ **Nivel Estático.** – Es el nivel de agua presente en la formación acuífera antes de comenzar el bombeo, mayor detalle en la Figura 1-12. Este nivel se ve afectado por efectos meteorológicos (precipitación, infiltración) estacionales o por cargas adicionales (edificaciones), o por la descarga producida por pozos cercanos.
- ❖ **Nivel Dinámico.** – También llamada nivel de bombeo, por lo que es producido cuando comienza la descarga del acuífero por el pozo. Este nivel depende del caudal de bombeo, del tiempo de bombeo y de las características hidrogeológicas del acuífero. También se debe tener en cuenta la técnica desarrollada en el diseño de pozo.

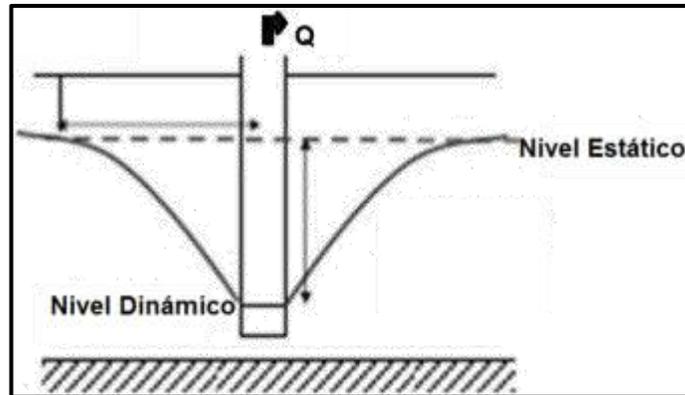


Figura 1-12.- Nivel Dinámico y Nivel Estático.

- ❖ **NPSH.** - La carga de succión positiva neta es la carga total mínima necesaria para poder realizar la succión evitando la cavitación, es decir, cualquier valor por debajo de este parámetro producirá la evaporación del fluido en la succión y la cavitación como consecuencia. Desde el punto de vista del fabricante este valor debe ser proporcionado, resultando en un $NPSH_{requerido}$. En función de una instalación de bombeo, el $NPSH_{disponible}$ se puede expresar con la Ecuación 1-18 y si éste es mayor que el requerido por el fabricante, se asegurará de que el equipo no cavita:

$$NPSH_{disponible} = \frac{P_{atm} - P_{vapor}}{\rho g} \pm Z_{succ} - h_f \text{-----} 1-18$$

Z_{succ} es el nivel de la succión que dependerá de la obra en la succión. Para bombas verticales se calcula por la Ecuación 1-19, siendo un valor positivo.

$$Z_{succ} = L_{bomb} + L_{TV} - ND \text{-----} 1-19$$

- ❖ **Número de Reynolds.** - Es un número adimensional el cual es una medida de las fuerzas de inercia sobre las fuerzas viscosas, tal relación se muestra en la Ecuación 1-20:

$$R_e = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu_c} \text{-----} 1-20$$

Donde ρ es la densidad del fluido. V es la velocidad del fluido dentro de la tubería, D es el diámetro, μ es la viscosidad dinámica y ν_c es la viscosidad cinemática tal que es equivalente a $\nu_c = \frac{\mu}{\rho}$.

- ❖ **Peso específico.** - Cada fluido tiene una densidad característica. El agua, que se usa como término de comparación, tiene una densidad de 1 g/cm^3 (a 4°C y a nivel del mar). El peso específico (Ecuación 1-21) representa el valor de la densidad multiplicada por la gravedad, esto es, es el peso de fluido por unidad de volumen y suele expresarse en newton sobre metro cúbico.

$$\gamma = \rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] g \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = P_e \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right] \text{-----1-21}$$

- ❖ **Sumergencia.**- Se refiere a la diferencia en carga hidrostática entre la profundidad de la bomba y el nivel de fluido dinámico por encima de la bomba, como se muestra en la Figura 1-13

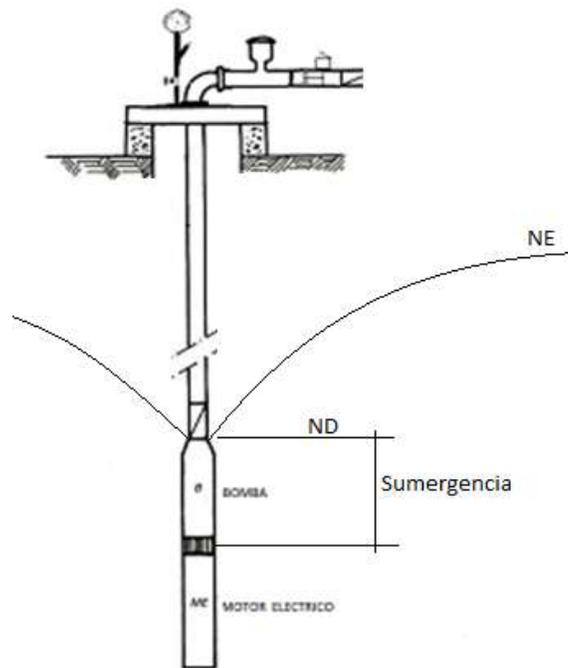


Figura 1-13.- Sumergencia mínima

- ❖ **Viscosidad.** - Se trata de una característica del fluido bombeado: representa su capacidad de oponerse al desplazamiento o la resistencia que tienen las moléculas que conforman un líquido para separarse unas de otras, es decir, es la oposición de un fluido a deformarse y esta oposición se debe a las fuerzas de adherencia que tienen unas moléculas de un líquido o fluido con respecto a las otras moléculas del mismo líquido. La viscosidad en el caso de los líquidos disminuye con la temperatura y normalmente se representa por el símbolo μ .

Comúnmente se relaciona la viscosidad en los fluidos con el Número de Reynolds en la Ecuación 1-20.

1.7.Aspectos generales sobre operación de sistemas de bombeo.

Si bien en esta tesis, es decir en este tipo de diagnósticos, se puede llegar a plantear la sustitución de uno o varios equipos de bombeo de pozo profundo, existen otras alternativas que no requieren de medidas tan drásticas como la sustitución por un equipo nuevo, sino más bien modificar o ajustar la operación del equipo actual.

En este sentido, en los casos en que el sistema ha sufrido desgastes debido a malas prácticas, necesariamente se verá reflejado en la curva del sistema: si por ejemplo, se tiene un sistema operando en el punto de la extrema derecha de la Figura 1-14, y si en ese punto se está produciendo la cavitación del equipo, esto se puede evitar fácilmente desplazando la curva al BEP de la bomba mediante la estrangulación en la línea de distribución, con este efecto se estaría prolongando su vida útil al llevar la bomba al punto de operación adecuado. Para el caso mencionado aunque la bomba no cavitara en el punto de la extrema derecha, llevarlo al BEP implicaría una ganancia de alrededor de 10 puntos porcentuales en la eficiencia del equipo, sin embargo, en esta situación es en donde se tendría que jerarquizar la importancia de la eficiencia contra el suministro del líquido. La curva del extremo izquierdo representa un estrangulamiento inadecuado que conduce a una entrega reducida del gasto y una eficiencia aún más baja que la de la curva del extremo derecho. Se estaría haciendo una mala práctica al operarlo deficientemente.

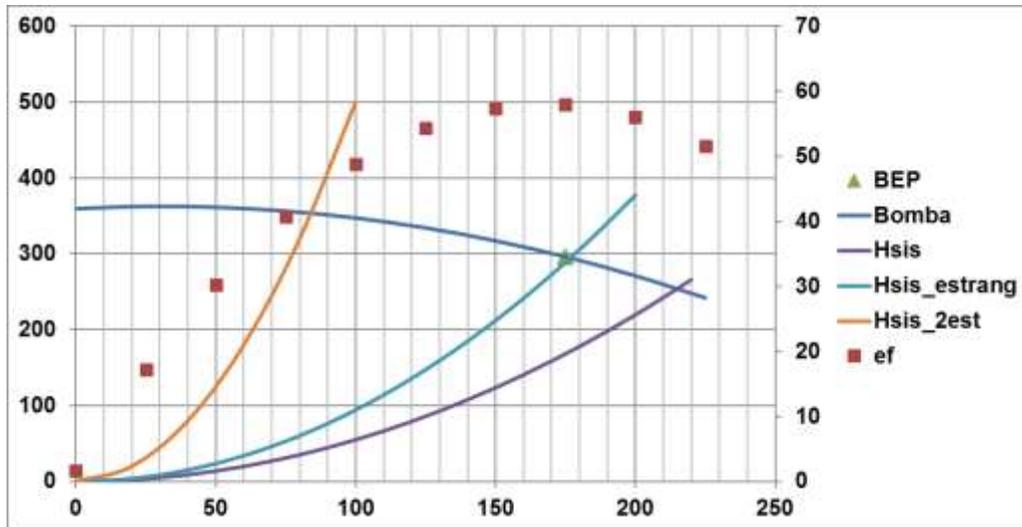


Figura 1-14.- Curvas por estrangulamiento de gasto.

Otra situación se da cuando se requiere un abastecimiento fluctuante, esto es, no sólo operar la bomba a su máxima capacidad en todo momento, más bien que se requiera del gasto máximo en algunos horarios mientras que en otros sólo se necesite un abastecimiento menor.

Para ejemplificar la situación anterior, se tiene en un poblado municipal en el estado de Oaxaca la siguiente demanda: en la Figura 1-15 se muestra la gráfica de la demanda de agua que varía durante el transcurso del día.

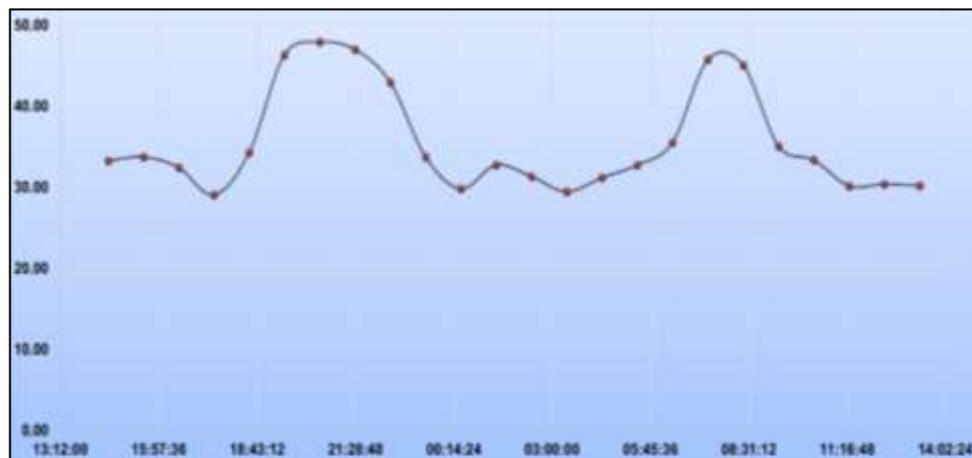


Figura 1-15.- Demanda variable en un día de operación

Situaciones como las anteriores son muy comunes en muchos lugares y es cuando se suelen utilizar métodos de regulación de flujo. Existen dos métodos para realizar la

variación de gasto, uno de forma mecánica manual o electro mecánica mediante una válvula reguladora de control sobre la línea de distribución, y la regulación utilizando un variador de velocidad al motor y este a su vez a la flecha, engrane, cigüeñal, etc. de la bomba.

De la gráfica de demanda de la Figura 1-15, la bomba opera en un rango entre 29 y 47 l/s lo que da un margen de 18 l/s de oscilación. Lo que se sabe es que el abastecimiento máximo solo se necesita alrededor de 7 horas de las 24 horas del día, lo que deja las otras 17 horas operando la bomba a su máxima capacidad en cuanto no es necesario.

Las implicaciones de uno y otra manera de regular el gasto son las siguientes: en el primer caso, se estrangula el sistema modificando su curva. La operación del conjunto bomba-sistema, se da a lo largo de la curva de carga-gasto, por lo que, al moverse a la izquierda, puede llegarse a una zona de baja eficiencia. En el segundo caso, se aprovechan de manera muy significativa las leyes de semejanza, de manera que se pueden tener ahorros de potencia que van con $(N_1/N_{max})^3$. En este caso la curva del sistema permanece inalterable mientras que lo que cambia son las curvas de operación de la bomba lográndose esto sin cambiar la eficiencia.

La consideración de un variador de velocidad ha resultado mucho más ventajoso no sólo por llevar la bomba a su punto de operación adecuado, sino ahorrar en cuanto a la demanda eléctrica del motor eléctrico, como se muestra a continuación

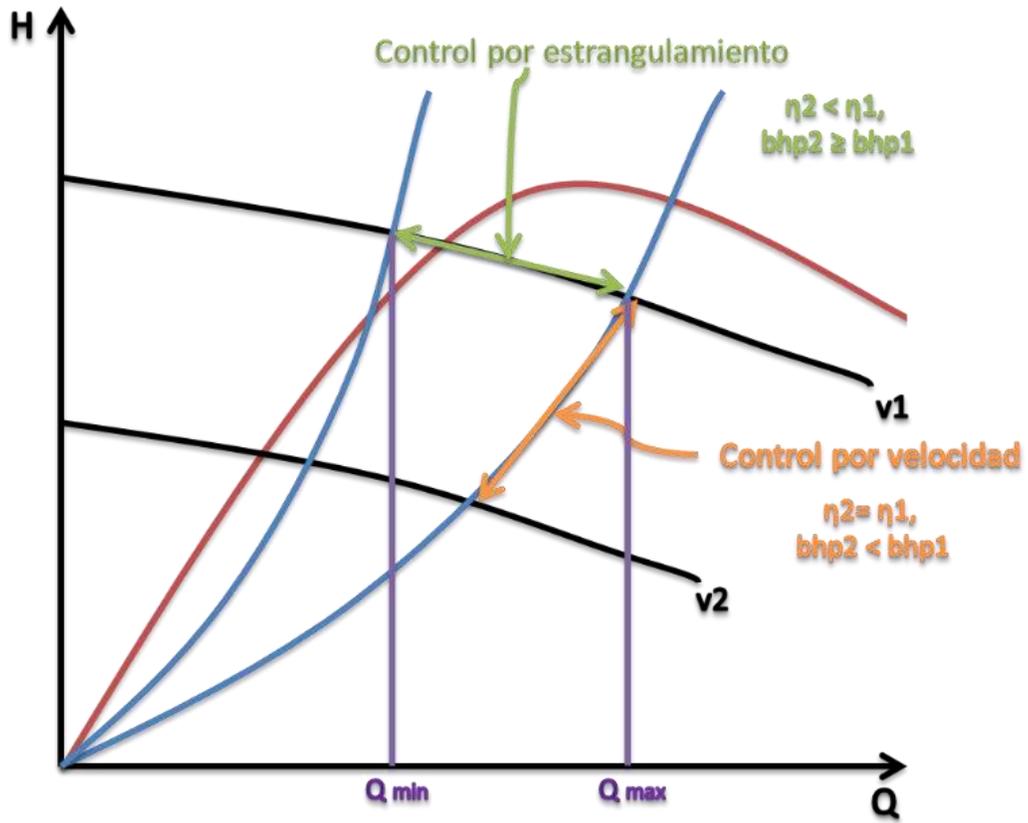


Figura 1-16.- Tipos de controles

CAPÍTULO 2

Omnis quaestio est solutio ...

El sistema actual consta de 7 equipos de bombeo de operación continua de diversos tamaños, con la distribución geográfica de los sistemas de abastecimiento de agua potable tal como se observa en la Figura 2-2.



Figura 2-2.- Distribución de bombas de agua potable.

Habiendo mencionado las características generales y geográficas de la zona de control en donde se realizaría el diagnóstico energético, el paso siguiente para conocer el estado de los equipos instalados fue efectuar una inspección física para tomar nota de su estado aparente, ubicar puntos de medición y posteriormente, para instalar los equipos de

medición, tanto los involucrados en la demanda y consumo de energía eléctrica como los utilizados en la medición de los parámetros hidráulicos. Se pudieron conocer de primera mano algunos detalles relevantes de las instalaciones, que se complementaron con los obtenidos una vez efectuadas las mediciones, el análisis y cálculo de los parámetros de interés. A continuación en la Tabla 2-1 se presentan las características principales en las que se encuentran operando los equipos de abastecimiento de agua. La información nominal, potencia demandada, carga y gasto, los cuales fueron proporcionados por el cliente y con ellos se determinaron los otros parámetros mostrados.

Tabla 2-1.- Características actuales de bombas en uso

Pozo No.	Tipo	Potencia nominal motor [kW] (hP)	Potencia demandada [kW]	Carga de bombeo, H [m]	Gasto, Q [l/s]	Pot Hidráulica [kW]	eficiencia global ME-B [%]	eficiencia BOMBA [%]
1	Sumergible	22.38 (30)	26.92	16.75	47.66	7.83	29.09	34.38
2	Sumergible	18.65 (25)	17.62	23.39	40.66	9.33	52.94	63.82
3	Vertical	37.3 (50)	N/O	N/O	N/O	N/A	N/A	N/A
4	Sumergible	37.3 (50)	43.56	79.13	26.87	20.86	47.88	57.35
5	Vertical	29.84 (40)	26.9	25.06	42.93	10.55	39.23	48.08
6	Vertical	37.3 (50)	40.8	15.27	46.12	6.91	16.93	18.81
7	Sumergible	37.3 (50)	37.4	23.15	44.47	10.10	27.00	28.72

La tabla anterior refleja que los equipos operan en condiciones dispersas entre ellos, al menos la bomba 2 cubriría los requisitos especificados en la NOM-006-ENER-2015 (*Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y método de prueba.*). Las condiciones de operación deficientemente de varios de los equipos se deben a cargas de bombeo bajas, lo que podría llevar a los equipos a cavitarse, así mismo por efecto dominó, a deteriorarse cada vez más, perdiendo eficiencia en el proceso.

El monitoreo a realizar se llevó a cabo con base en las recomendaciones establecidas en las NOM-010-ENER-2004 (*Eficiencia energética del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo. Límites y método de prueba.*), NOM-001-ENER-2014 (*Eficiencia energética de bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical. Límites y método de prueba.*), NOM-004-ENER-2014 (*Eficiencia energética para el conjunto motor-bomba, para bombeo de agua limpia de uso doméstico, en potencias de 0,180 kW (¼ HP) hasta 0,750 kW (1 HP).- Límites, métodos de prueba y etiquetado.*) y NOM-006-ENER-2015, en las que se recomienda utilizar periodos

continuos de medición con muestreos intermitentes, para las mediciones hidráulicas y eléctricas.

El objetivo de este diagnóstico es obtener argumentos sólidos para proponer medidas que permitan el mejoramiento del sistema, desde proponer medidas operativas hasta el remplazo de los equipos de bombeo por otro de alta eficiencia. Aunque de acuerdo a la tabla 2-1, esto pudiera ser el caso de la mayoría de equipos se recomienda en primer lugar hacer un estudio de la demanda que sirva para definir las condiciones de diseño y posteriormente, recomendar equipos que abastezcan la demanda necesaria siendo éstos de alta eficiencia. Es evidente pues, que la baja carga se está dando porque la mayor parte del tiempo la demanda de líquido está superando a lo que entregan las bombas lo que origina baja presión en la tubería principal.

Para el monitoreo fue necesario como se comentó, definir la ubicación para las mediciones, teniéndose que generar material e instrumentación adicional ad hoc para que cada equipo cuente con los recursos adecuados para la instalación y puesta en marcha del monitoreo de evaluación energética.

2.2. Instrumentación Requerida.

Con el fin de obtener los parámetros eléctricos e hidráulicos que permitan determinar las condiciones reales de operación, que implican conocer la carga, el gasto, la eficiencia de combinada bomba-motor, eficiencia del motor, eficiencia de la bomba, y al mismo tiempo poder determinar si el equipo funciona en condiciones adecuadas, y verificar si el equipo cavita o no, se definieron los siguientes equipos.

2.2.1. Equipos Eléctricos.

Tomando como referencia las NOM-004-ENER-2014 y NOM-006-ENER-2015 que establecen rangos de operación para un conjunto motor-bomba para bombeo de agua y procedimientos de medición, se definieron los equipos a utilizar:

- ✚ Analizador de redes. - Tal como lo menciona (ABB, 2013) “El analizador de redes tiene funciones de análisis avanzado que permiten una medida efectiva de los principales parámetros eléctricos en redes trifásicas o monofásicas: tensión, corriente, frecuencia, factor de potencia, potencia activa y reactiva, energía activa y reactiva. Integrado en paneles eléctricos de media o de baja tensión, el analizador permite la medida y el análisis en tiempo real de los parámetros eléctricos, así como la verificación de la calidad de la energía gracias a la medida de THD (Total Harmonic Distortion).

Para el caso de este proyecto se utilizó el analizador (con certificado) HT Instruments modelo PQA824. Las especificaciones técnicas de este equipo se encuentran en el apéndice 1

- ✚ Cámara Termográfica. -También pueden llamarse FLIR (Forward Looking Infra Red) o de imágenes térmicas. A diferencia de las cámaras de video que registran las diferentes longitudes de onda de la luz visible como imágenes, estos dispositivos detectan la luz invisible como los infrarrojos, también conocido como ondas de calor. Los rayos Infrarrojos es radiación electromagnética con una longitud de onda más larga que la luz visible. Por lo tanto, resulta invisible para el ojo humano.

La utilización de este tipo de dispositivo dentro del diagnóstico fue una cámara FLIC marca FLUKE, modelo Ti450 (Validación ISOTest: ISO 18434-1:2008). Las especificaciones técnicas de este equipo se encuentran en el apéndice 2

2.2.2. Equipos Hidráulicos.

Tomando en este caso como referencia a las NOM-004-ENER-2014 y NOM-006-2015 que aportan información sobre el rango de operación adecuado en función del diámetro de succión, carga dinámica y gasto. Los equipos utilizados fueron:

- ✚ Medidor de flujo ultrasónico. – Este tipo de medidor no intrusivo basa su funcionamiento en el principio de que las ondas de sonido que viajan con el flujo se moverán más rápido que las que viajan en contra del flujo. La diferencia de tiempo de tránsito de estas señales es directamente

proporcional a la velocidad del flujo del líquido y por consiguiente es posible determinar el flujo volumétrico utilizando en el cálculo el diámetro interior de la tubería. Es importante por lo tanto tener en claro datos como tipo de líquido, material y espesor del tubo donde se realizará la medición. El medidor utilizado fue el medidor ultrasónico de tiempo en tránsito modelo TTFM100B, con certificado ISO. Las especificaciones técnicas de este equipo se encuentran en el apéndice 3

- ✚ Manómetros digitales. - Este tipo de manómetros son ideales para obtener una medida de presión rápida y precisa en un punto concreto de una instalación o ensayo. Tienen la particularidad de unir un sensor de presión y un visualizador LCD de bajo consumo. El resultado final es un elemento para la medida de presión con pantalla digital. Los rangos y características son variados. A diferencia de los manómetros analógicos, en las series digitales no se tienen problemas de rotura de aguja o errores en la medida por una mala ubicación del lector. El modelo utilizado fue manómetro ADDITEL 681LS. Las especificaciones técnicas de este equipo se encuentran en el apéndice 4

Para la instalación de este equipo se necesitaron dos aditamentos adicionales, se requirió de un tubo largo para lograr la medición del nivel dinámico y estático, esto de acuerdo con lo descrito en la NOM-004-ENER-2013, y el otro aditamento fue una protección para el manómetro en la descarga, una cola de cochino con válvula de paso. Ambos se describen a continuación.

1. Aditamento de inyección de aire. – La medición de los niveles estático y dinámico requería de presurizar el tubo largo para igualar la presión del pozo. Para este efecto se diseñó un sistema de llenado con válvula de aire utilizándose tubos de hierro con diámetro de $\frac{1}{4}$ de pulgada, una conexión en “Ye”, llave de paso y una válvula de aire la cual fue soldada a lo anterior, así como coples y niples para las uniones roscadas, obteniendo la configuración que se muestra la figura 2-3.

La unión de la válvula de aire a un tapón macho de cobre se realizó mediante soldadura de tipo aleación plata-cobre (10-90), y posterior a una tubería de 10 cm, la cual se conectó a la tubería de acero mediante unión roscada y sellada con cinta teflón.

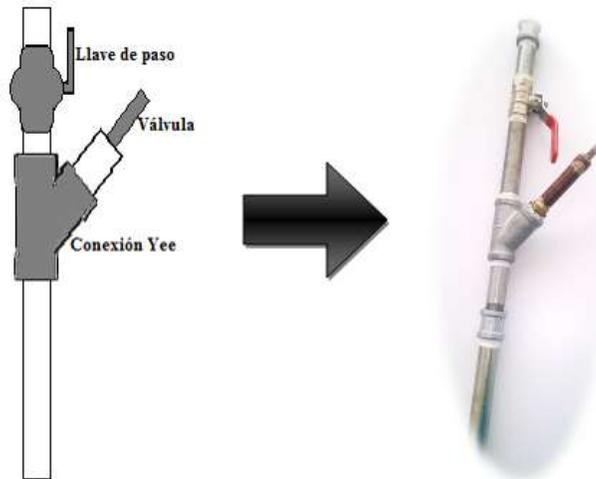


Figura 2-3.- Aditamento de inyección de aire

2. Aditamento amortiguador de presión. - En este utensilio se utilizó tubería de hierro con diámetro de $\frac{1}{4}$ pulg., conexión de tubería en curva a 180° (sifón o cola de cochino), llave de paso, coples y niples como se observa en la figura 2-4.

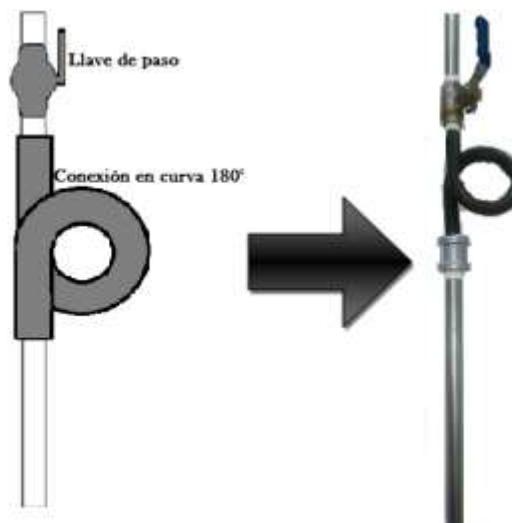


Figura 2-4.- Instrumento regulador de presión con sifón

Este tipo de conexiones son las que habrá que tener preparadas para el momento en que se tenga que realizar un monitoreo, con el único fin de agilizar la toma de mediciones en el lugar esperado.

2.3.Instalación de Equipo de Monitoreo.

La instalación fue realizada de acuerdo con lo establecido en las NOM siguiendo los métodos de prueba ahí descritos. A continuación, se presenta una breve explicación sobre la forma correcta en cuanto a la instalación de los equipos y aditamentos auxiliares.

- ❖ Cámara termográfica- En el caso de la cámara Termográfica se realizaron varias tomas térmicas para asegurar que éstas fuesen congruentes entre sí, la figura 2-5 muestra el tipo de resultado obtenido sobre el arrancador de la bomba

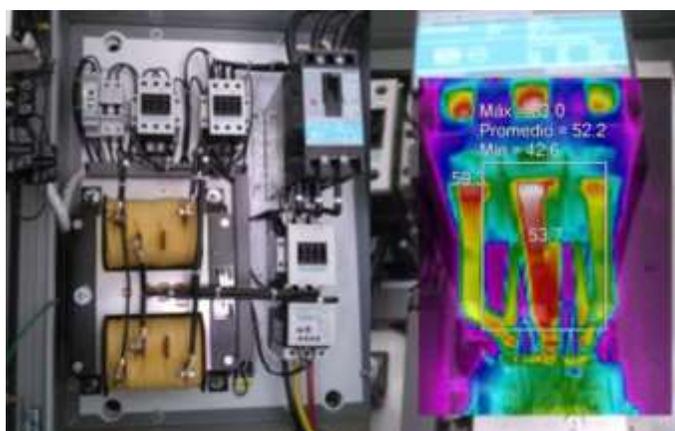


Figura 2-5.- Toma termográfica

Con respecto a la instalación de los otros dispositivos, de igual manera se recomienda presentar un esquema de la forma en que se debe usar junto con evidencia fotográfica de cómo se utilizó.

- ❖ Analizador de Redes. - La instalación de este dispositivo depende del tipo de corriente que recibe el equipo, pues en la mayoría de estos equipos se recibe línea de corriente trifásica y es en éstas donde se instalan los cables de inducción y éstos a los caimanos y posteriormente al equipo de medición, resultando la configuración de la Figura 2-6.



Figura 2-6.- Instalación de Analizador de redes

- ❖ Medidor ultrasónico de flujo. - Para programar este dispositivo se requiere conocer las características del sistema: material de tubería, diámetro y espesor de la tubería, velocidad del sonido del fluido manejado. Al utilizar estos valores, el dispositivo calcula la distancia entre los transductores. En este caso se utilizaron transductores tipo TS-1 en configuración tipo V como se muestra la Figura 2-7. Así mismo la NOM-001-ENER-2014 brinda una indicación acerca de la colocación del medidor, lo cual corresponde a 5-10 diámetros de tubería de alejamiento de cualquier perturbación, con lo cual se trata de que el fluido sea lo más homogéneo posible y la tubería totalmente horizontal.



Figura 2-7.- Instalación de transductores TS-01 de medidor de flujo ultrasónico

Posterior a la instalación se verifica en la pantalla del Medidor de flujo los valores de calidad y sensibilidad de los transductores (Figura 2-8).



Figura 2-8.- Señales de sensibilidad de medidor de flujos líquidos

Se consideran como valores aceptables calidad (Quality) arriba del 70% y señal (Signal) superiores a los 600 hz.

- ❖ Manómetros Digitales. - La colocación de los manómetros se fundamenta en la NOM-014-ENER-2014 (Figura 2-9) donde se indica que la instalación del manómetro de descarga corresponde a 10 veces el diámetro de tubería alejado del codo de descarga con la siguiente configuración

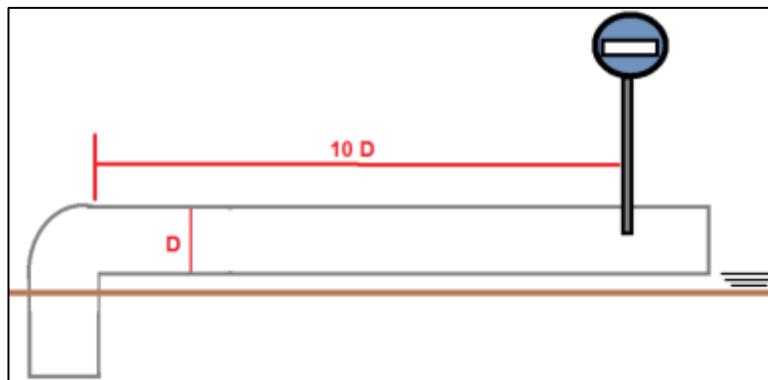


Figura 2-9.- Diagrama de instalación de manómetro de descarga

La instalación para el trabajo en campo está sujeta a las características y restricciones particulares de cada sistema por lo que en cada caso se hace necesario hacer adaptaciones o utilizar los elementos ya instalados tratando de cumplir con lo establecido en las NOM. En este caso, la figura 2-10, muestra la ubicación del manómetro instalado



Figura 2-10.- Toma fotográfica de instalación real de manómetro de descarga.

En el caso del segundo manómetro unido a un tubo largo de CPVC que se utiliza a modo de popote con el fin de medir el nivel dinámico (bomba con gasto mayor a cero) y estático (se opera con gasto igual a cero) haciendo que la tubería alcance ambos niveles de operación de la bomba. Para lograr esto se realiza un orificio con taladro en la base de entrada al pozo (no en la tubería del fluido), en donde se introduce dicha tubería, de acuerdo con la siguiente configuración (Figura 2-11)

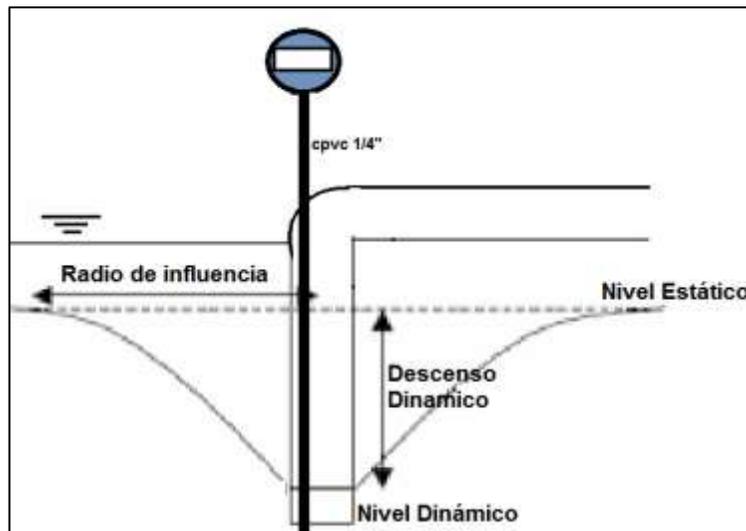


Figura 2-11.- Diagrama de instalación de manómetro de succión (NE y ND)

En el caso para este estudio para lograr la configuración deseada, se perforó en la placa de la base del pozo, un agujero de $\frac{1}{2}$ pulgada, logrando así la configuración de la figura 2-12



Figura 2-12.- Toma fotográfica de instalación real de manómetro de descarga.

Una vez en sitio, para la captura de datos los manómetros se conectaron a una laptop para guardar la información en tiempo real del monitoreo realizado por éstos, mediante cables con terminal RS232 a USB. Se utilizó el software ADDITEL LOG II con el cual se llevó el registro del monitoreo y posteriormente los datos se exportaron a una hoja de cálculo de Excel para su análisis.

La figura 2-13 es una impresión de pantalla del funcionamiento del software con ambos manómetros. Se han omitido los valores de medición por motivos de confidencialidad, en cada franja negra se muestran los valores de operación o funcionamiento del equipo en tiempo real, así como los valores estadísticos de mínimo, máximo, y promedio.

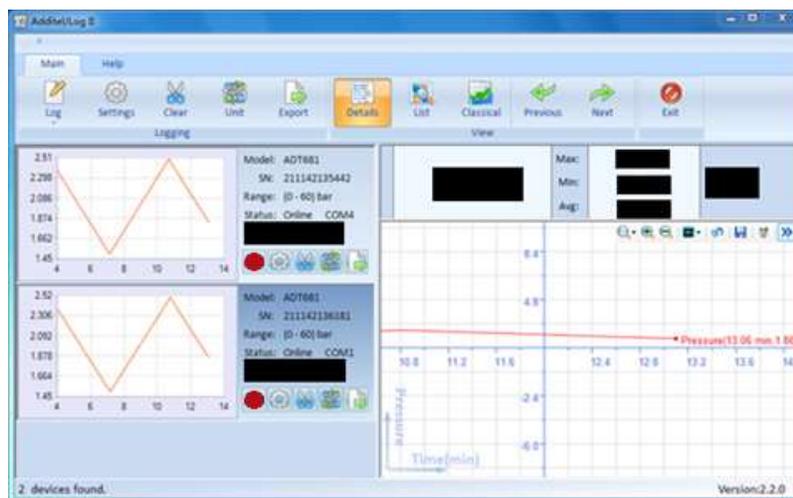


Figura 2-13.- Software operador de manómetros

En este capítulo se ha plateado la problemática, así mismo las soluciones y acciones que se hicieron en campo a fin de realizar la evaluación sobre el estado de su sistema. Con los resultados obtenidos surgen las recomendaciones a fin de que con un plan de acciones se pueda ver beneficiado el poblado y operar dentro de las NOM mexicanas en cuanto a eficiencia energética.

CAPÍTULO 3

Et vitae est cogitatio...

Para realizar la medición de los parámetros hidráulicos se requería instalarlos en el exterior por lo que había que tomar en cuenta la posibilidad de lluvia y evitar se mojasen, en consecuencia, adaptarlos a las condiciones de cada pozo, con el único fin de recabar la mayor información posible durante el tiempo establecido para monitoreo de cada estación de bombeo.

3.1.Registro de Campo

En este punto se instalaron los equipos del capítulo anterior: el analizador de redes, el medidor de flujo ultrasónico, los manómetros y se realizaron las tomas termográficas con base en las especificaciones ya mencionadas. Se obtuvo la información buscada. En la Tabla 3-1 se muestra una parte de los datos obtenidos para el pozo #4.

Tabla 3-1.- Datos de monitoreo

POZO 4						
Hora	T	ND	Q	vel	P-desc	Pot_elec
	[°C]	[mca]	[Gpm]	m/s	[kPa]	[kW]
10:23	22.4	-13.3	426.2	1.5	824.3	44.3
11:23	22.5	-13.3	425.8	1.5	824.9	44.4
12:24	23.8	-13.3	426.9	1.5	823.2	44.4
13:24	23.9	-13.3	428.2	1.5	822.4	44.4
14:24	24.4	-13.3	428.9	1.5	820.0	44.4
15:25	25.2	-13.4	429.2	1.5	817.0	44.4
16:25	25.1	-13.4	431.1	1.5	813.6	42.7
17:26	25.1	-13.6	438.0	1.5	813.4	43.0
18:26	26.8	-14.5	475.0	1.6	714.5	43.0
19:27	27.3	-14.9	493.9	1.7	617.4	43.6
20:27	28.1	-15.1	505.9	1.7	619.1	43.7
21:28	27.4	-15.1	505.5	1.7	623.5	43.9
22:28	26.7	-15.0	501.0	1.7	624.3	43.9
23:29	26.1	-15.0	499.8	1.7	626.1	44.2
00:29	25.5	-14.9	497.1	1.7	690.4	44.4
01:30	24.8	-14.8	492.4	1.7	691.1	44.4
02:30	24.2	-14.4	470.7	1.6	724.0	44.4
03:31	24.1	-14.3	465.2	1.6	758.2	43.9
04:31	24.1	-14.3	465.2	1.6	758.6	42.5
05:32	23.9	-14.0	451.4	1.6	761.0	41.4
06:32	23.7	-14.0	451.4	1.6	761.4	40.6
07:33	23.5	-13.7	440.3	1.5	827.1	41.4
08:33	23.1	-13.7	440.3	1.5	827.6	43.9
09:34	22.9	-13.6	438.2	1.5	827.7	44.2

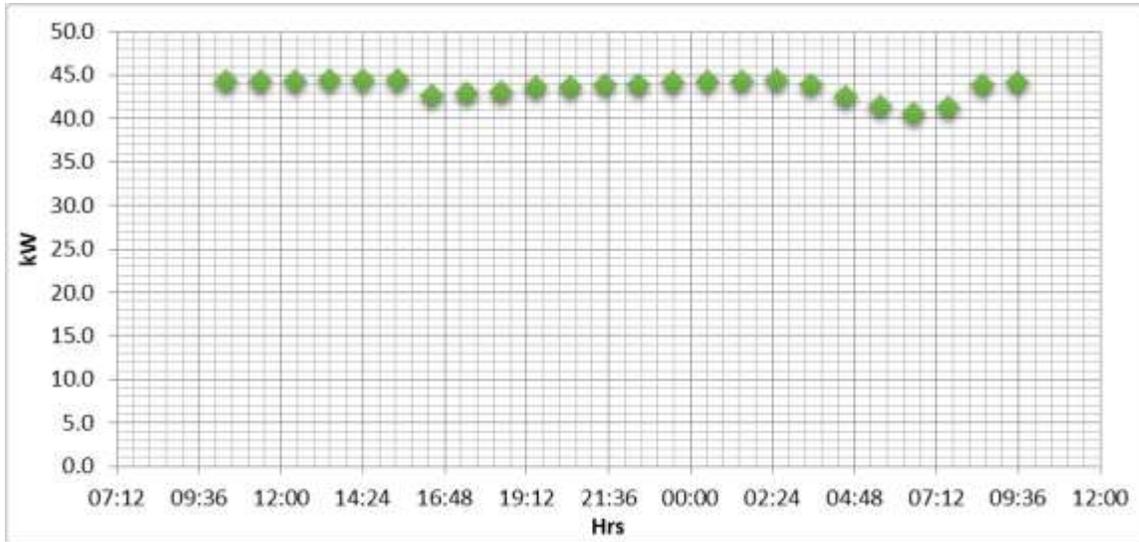


Figura 3-1.- Monitoreo de consumo eléctrico

Respecto a la información de placa del equipo se tiene la siguiente Tabla 3-2.

Tabla 3-2.- Datos de placa de bomba

H	62.8	[m]
H max	87	[m]
Q	313	[gpm]
Pot	50	[hp]
Frecuencia	60	[Hz]
n	3500	[rpm]
zp	2	[etapas]
Motor	Trifásico	

La primera lectura de la información obtenida (Tabla 3-1), al contrastarla con la Tabla 3-2, permite ver que el equipo se encuentra fuera de la zona de operación recomendada, sin embargo, para conocer detalladamente el estado de operación del equipo de bombeo profundo se tendría que realizar una evaluación más detallada.

3.2. Análisis de Datos de Fabricante

Después de conseguir la curva característica correspondiente a la bomba sumergible, cuando se cuente con ésta, se recomienda digitalizarla: La curva obtenida en este caso se muestra en las Figura 3-2 a y b.

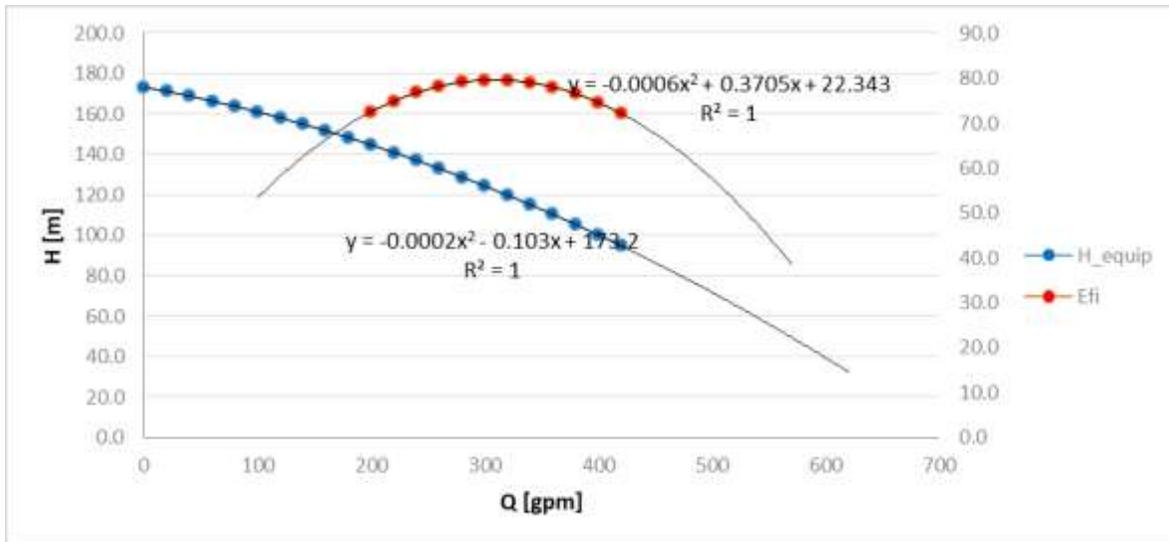


Figura 3-2a.- Curvas H-Q y eficiencia-Q

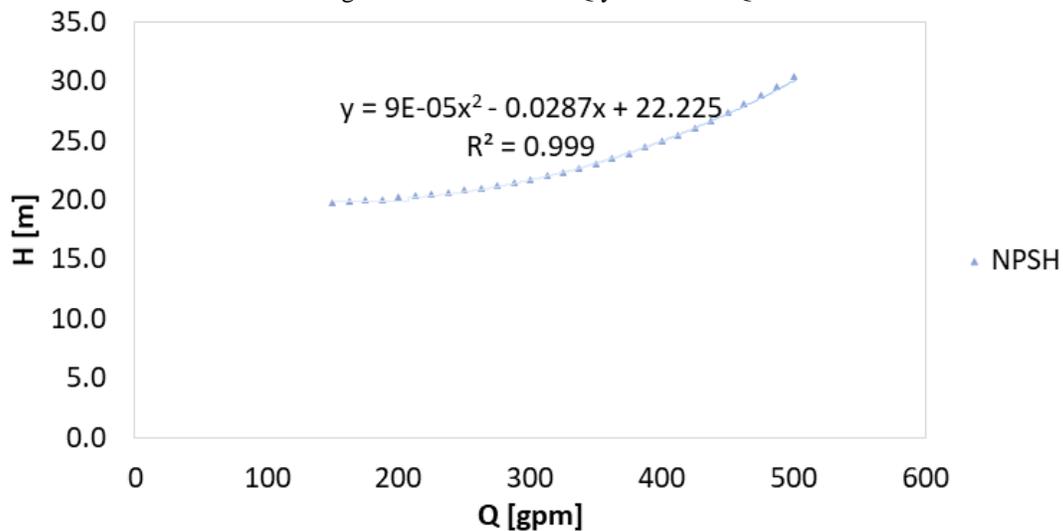


Figura 3-2b.- Curva de NPSH-Q

Al realizar la digitalización además de que se cuenta con las curvas características, así mismo se dispone de los ajustes correspondientes a las curvas. Con esta información, se pueden generar fácilmente comparaciones entre las condiciones de operación obtenidas con el monitoreo, y las recomendadas por el fabricante.

3.3. Análisis del Registro de Monitoreo

Del monitoreo efectuado se tiene el registro hidráulico y eléctrico que se presentó en la tabla 3-1. Por otro lado, se obtuvieron lecturas puntuales de otros parámetros que se utilizan en el cálculo, la tabla 3-3 muestra algunos de esos datos.

Tabla 3-3.- Parámetros complementarios

Altura _{manómetro}	0.77	m
Long. _{bomba}	0.59	m
Long. _{T. vertical}	18	m
H _{f-tubería}	0.48	m
NE	4.81	m
Dist. _{Codo-tramo-tub}	0.05	m
Dist. _{Med-flujo}	1	m
Diám. _{int}	202.7	mm
Área _{int}	0.032	m ²
η _{motor eléctrico}	83.5	%

Para realizar una evaluación del estado del equipo contra el que debiera tener de acuerdo con la información técnica del fabricante, se deberá conocer el estado en que éste opera por lo que se calculan los parámetros necesarios con las ecuaciones siguientes, utilizando los datos conocidos, recopilados y medidos para la evaluación (Tablas 3-1 y 3-3).

- Presión de descarga corregida:

$$P_{desc-corr} = \left[\frac{\rho \times g \times h_{manometr}}{1000} + P_{desc} \right] [kPa] \text{-----3-1}$$

- Velocidad:

$$V = \left[\frac{Q \left[\frac{l}{s} \right] \left(\frac{1m^3}{1000l} \right)}{A_{int}[m^2]} \right] \left[\frac{m}{s} \right] \text{-----3-2}$$

- Carga dinámica total:

$$H = \left[P_{desc-corr} \left(\frac{1000}{\rho g} \right) + L_{bomb} + h_{f-tuverias} + L_{codo} + \Delta Z + h_{ftujometro} + \frac{v^2}{2g} \right] [m] \text{-----3-3}$$

- Potencia Hidráulica:

$$Pot_{hid} = \left[\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times g \left[\frac{m}{s^2} \right] \times H[m] \times Q \left[\frac{l}{s} \right] \left(\frac{1m^3}{1000l} \right) \right] [kW] \text{-----3-4}$$

- Nivel Dinámico:

$$ND = NE + \Delta Z [m] \text{-----3-5}$$

- Eficiencia total (Me-B):

$$\eta_{tot} = \frac{P_{hid}}{P_{elec}} \times 100 \text{ -----3-6}$$

➤ Eficiencia de la Bomba:

$$\eta_{bomb} = \frac{P_{hid}}{P_{elec} \times \eta_{ME}} \times 100 \text{ -----3-7}$$

Los resultados de aplicar las ecuaciones anteriores, exclusivamente para la bomba del pozo 4 del municipio Juchitán de Zaragoza, se presentan en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4.- Características de la bomba pozo 4

POZO 4										
Hora	T	ND	Q	P-desc	P-desc-corr	H	Pot_hid	Ef_Me-B	Ef_bomb	Pot_elec
	[°C]	[mca]	[L/s]	[kPa]	[kPa]	[mca]	[kW]	[%]	[%]	[kW]
10:23	22.4	-13.3	26.9	824.3	831.9	98.6	26.0	58.7	70.3	44.3
11:23	22.5	-13.3	26.9	824.9	832.4	98.6	26.0	58.6	70.2	44.4
12:24	23.8	-13.3	26.9	823.2	830.7	98.5	26.0	58.6	70.2	44.4
13:24	23.9	-13.3	27.0	822.4	829.9	98.5	26.1	58.8	70.4	44.4
14:24	24.4	-13.3	27.1	820.0	827.5	98.2	26.1	58.7	70.3	44.4
15:25	25.2	-13.4	27.1	817.0	824.6	97.9	26.0	58.6	70.1	44.4
16:25	25.1	-13.4	27.2	813.6	821.2	97.7	26.1	61.0	73.0	42.7
17:26	25.1	-13.6	27.6	813.4	820.9	97.8	26.5	61.7	73.8	43.0
18:26	26.8	-14.5	30.0	714.5	722.0	88.6	26.1	60.6	72.5	43.0
19:27	27.3	-14.9	31.2	617.4	625.0	79.1	24.2	55.5	66.4	43.6
20:27	28.1	-15.1	31.9	619.1	626.7	79.5	24.9	57.0	68.3	43.7
21:28	27.4	-15.1	31.9	623.5	631.1	80.0	25.0	57.0	68.3	43.9
22:28	26.7	-15.0	31.6	624.3	631.8	80.0	24.8	56.4	67.6	43.9
23:29	26.1	-15.0	31.5	626.1	633.7	80.1	24.8	56.1	67.2	44.2
00:29	25.5	-14.9	31.4	690.4	698.0	86.6	26.6	60.1	71.9	44.4
01:30	24.8	-14.8	31.1	691.1	698.7	86.6	26.4	59.5	71.2	44.4
02:30	24.2	-14.4	29.7	724.0	731.6	89.5	26.1	58.7	70.3	44.4
03:31	24.1	-14.3	29.3	758.2	765.8	92.9	26.7	60.9	73.0	43.9
04:31	24.1	-14.3	29.3	758.6	766.1	92.9	26.8	62.9	75.4	42.5
05:32	23.9	-14.0	28.5	761.0	768.6	92.8	25.9	62.7	75.1	41.4
06:32	23.7	-14.0	28.5	761.4	769.0	92.9	25.9	63.9	76.5	40.6
07:33	23.5	-13.7	27.8	827.1	834.6	99.3	27.1	65.4	78.3	41.4
08:33	23.1	-13.7	27.8	827.6	835.1	99.3	27.1	61.6	73.8	43.9
09:34	22.9	-13.6	27.6	827.7	835.3	99.3	26.9	60.9	73.0	44.2

Con los parámetros anteriores, se obtuvieron las curvas extremas del sistema, mismas que se muestran en la figura 3-2.

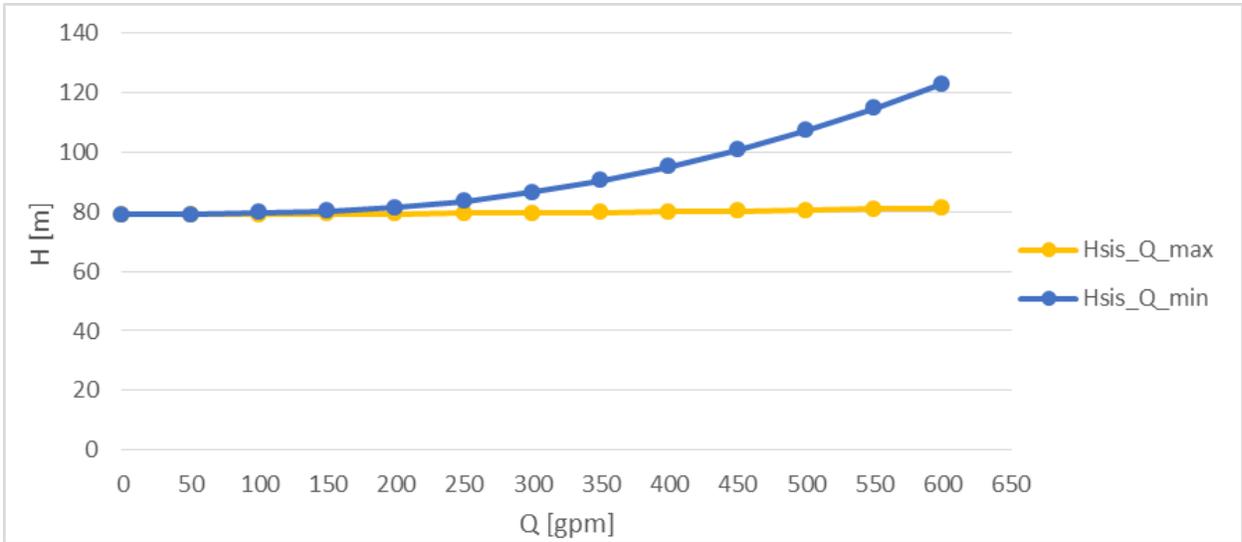


Figura 3-3.- Curva del sistema

3.4. Análisis de Resultados

En la figura 3-3 se muestran conjuntamente las curvas extremas del sistema, la curva característica de la bomba, y las mediciones realizadas en la bomba del pozo N°4.

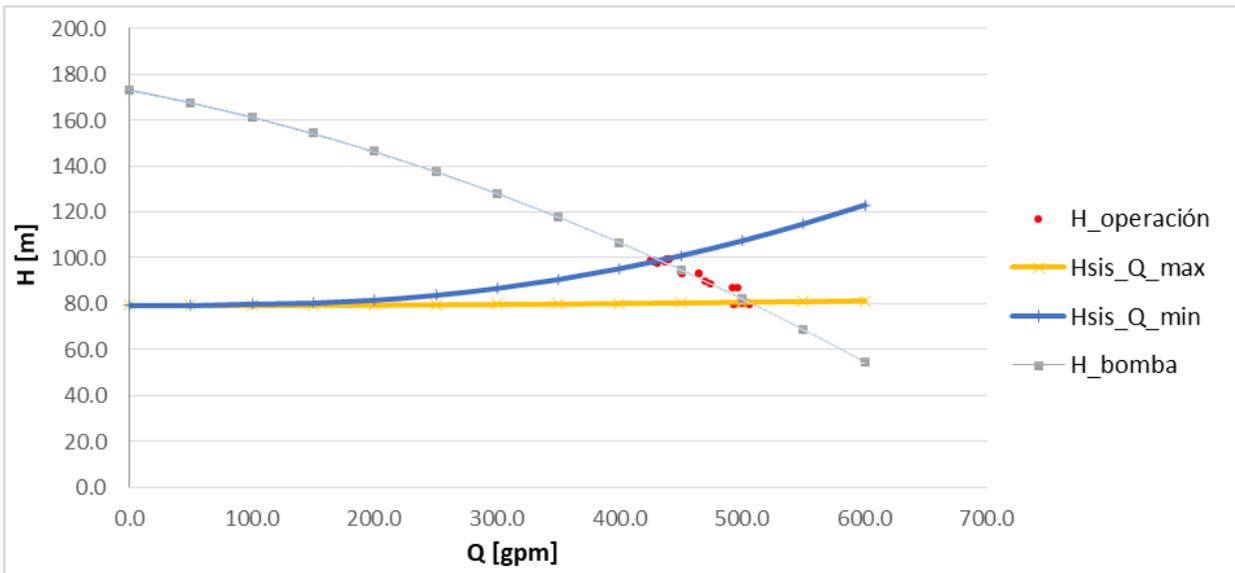


Figura 3-4.- Operación de bomba

En la gráfica anterior se puede observar que a gasto mínimo la bomba opera prácticamente en el límite máximo recomendado por el fabricante, mientras que a gasto máximo la carga cae en 20 unidades. Realizando un acercamiento en la zona de interés se tiene la Figura 3-4.

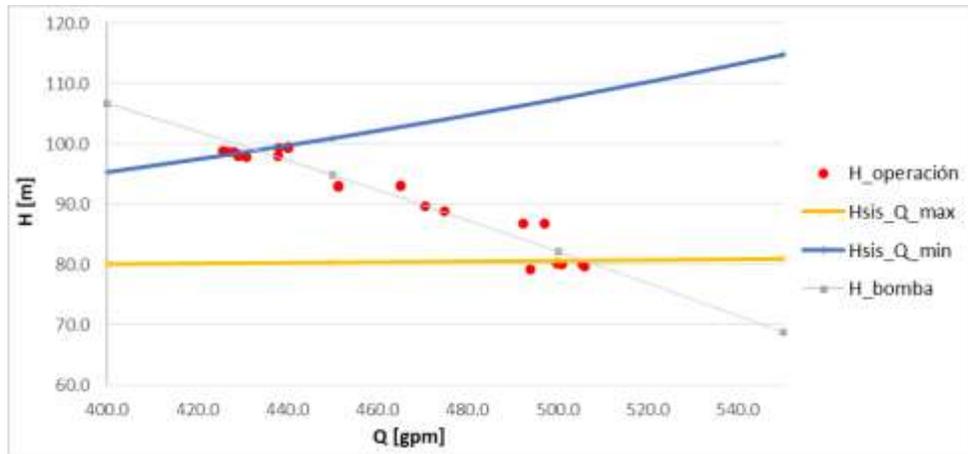


Figura 3-5.- Zona de interés

Partiendo de la Figura 3-4 se observa que la bomba opera en el rango delimitado por el gasto mínimo (cruce de la línea azul con la curva de carga de la bomba) y el punto de cruce con la curva amarilla cuando opera a máximo gasto. Cabe destacar que de la información del fabricante se conoce que el gasto máximo recomendado para este equipo es de 425 [GPM], lo que hace evidente notar que el rango en que opera la bomba es poco eficiente.

Utilizando la curva de eficiencia proporcionada por el fabricante se generó la Figura 3-5, que muestra la bomba con las curvas extremas del sistema. En este caso se hizo uso del ajuste obtenido (Figura 3-1) agregando una porción de 150 [GPM] hacia adelante con el fin de conocer la eficiencia con que opera la bomba ($\eta_{@Q_{min}} = 74.3$ y $\eta_{@Q_{max}} = 60.04$).

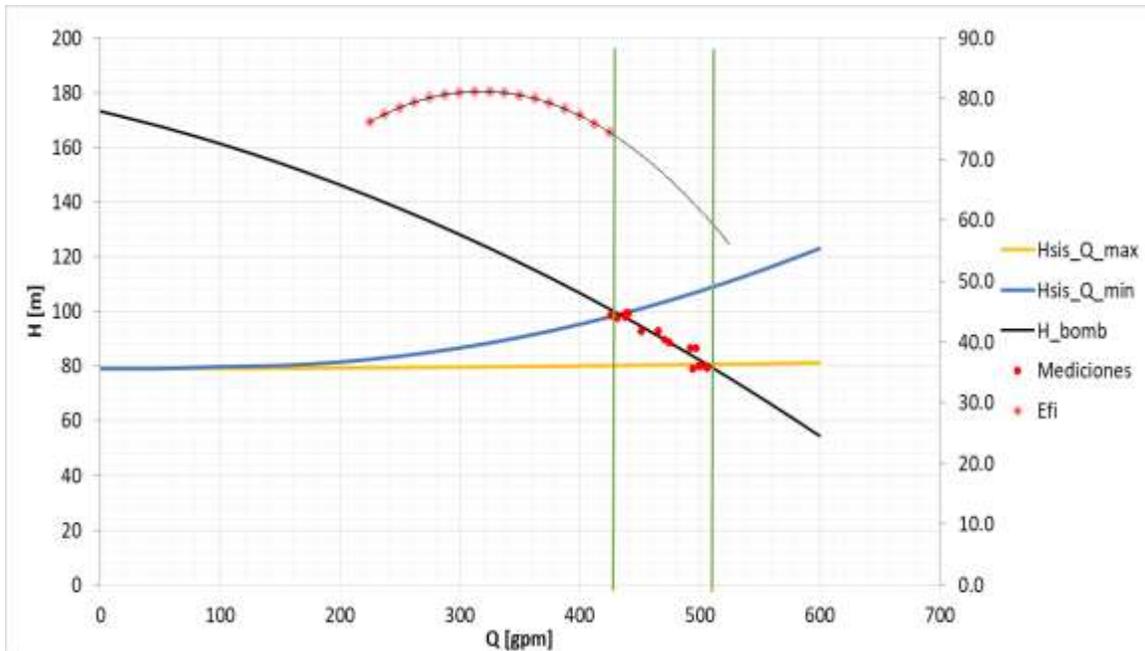


Figura 3-6.- Eficiencia de operación

En la Figura 3-5 se observa al cruzar líneas verticales, que la bomba opera fuera del rango recomendado por el fabricante. Esta forma de operación variable se debe a que no se cuenta con tanque elevado para redistribución del agua lo que origina esa variabilidad en la carga. La bomba se encuentra encendida en todo momento abasteciendo agua, pero con una variación en la carga y gasto.

Como consecuencia de la caída de presión en las líneas de distribución, el rango en que opera la bomba se ha desplazado hacia la derecha con respecto al rango recomendado por el fabricante (225-425 [GPM]), con lo cual cuando la bomba sale del rango de operación podría cavitarse, y de hecho lo hace.

En este caso se realiza un análisis de NPSH para saber si la bomba cavita o no (Tabla 3-5). Así que retomando las ecuaciones 1-20 y 1-21 para el caso del Q max de operación [505.1 GPM] y el h_f es cuasi constante, así se tiene:

$$NPSH_{disponible} = \frac{P_{atm} - P_{vapor}}{\rho g} + L_{bomba} + L_{TV} - ND - h_f$$

$$NPSH_{disponible} = \frac{100.96[\text{kPa}] - 4.72[\text{kPa}]}{997 * 9.81} + 0.59 + 18 - (-15.09) - 7.66 = 26.03[\text{m}]$$

De tal manera que el NPSH disponible del sistema es de 26.03 y el NPSH requerido por el equipo para el punto de gasto min es 26.05 [mca] y para gasto max 30.65 [mca].

Tabla 3-5.- NPSH requerido y disponible

	NPSH _{requerido} [mca]	NPSH _{disponible} [mca]
Q _{min} @425.84 gpm	26.05	26.03
Q _{max} @505.1 gpm	30.65	24.20

Se observa que el NPSH disponible no ha sido suficiente para cubrir la operación de la bomba, pues aún con Q_{min} el valor disponible es marginalmente menor que el requerido, esto es, la bomba ya cavita; para el caso cuando el gasto se mueve hacia un mayor valor y llega al Q_{máx} el equipo continúa cavitando, ahora con mayor intensidad ya que a ese valor el NPSH requerido llega a 30.65 [mca]. Entonces, la bomba cavita en el rango de gastos en los que se mueve por lo que la única manera de evitar el problema sería de reducir el gasto a un valor menor estrangulando la línea, se podría proponer ajustar el gasto a su máxima eficiencia. Esto habrá que analizarlo con mayor detalle ya que llevarlo a este punto significaría operar a unos 325 [GPM]. Dadas las condiciones actuales de operación y el deterioro, la bomba debería ser cambiada por una que se ajuste de mejor manera a las condiciones de diseño del sistema y que ofrezca mejores prestaciones.

En el monitoreo se observó que aunque la bomba varía en cuanto a gasto por causa del cambio en la carga en el sistema, el motor opera continuamente las 24 horas sin descanso, por lo que el consumo y costo anual tomando como referencia la tarifa 6 de CFE de ese año es:

Tarifa 6 (2014 - 2015)
 Consultar tarifas de:
 Servicio para bombeo de aguas potables o negras, de servicio público

1.- Aplicación
 Esta tarifa se aplicará al suministro de energía eléctrica para servicio público de bombeo de aguas potables o negras.

2.- Cuotas aplicables en el mes de de 2015.

2.1 Cargo fijo, independiente de la energía consumida
 \$ 330.25

2.2 Cargo adicional por la energía consumida
 \$ 1,812 por cada kilowatt-hora.

Figura 3-7.- Tarifa 6 de CFE, para sistemas de bombeo público.

Ahora del consumo monitoreado se tiene la Tabla 3-6

Tabla 3-6.- Consumos de energía

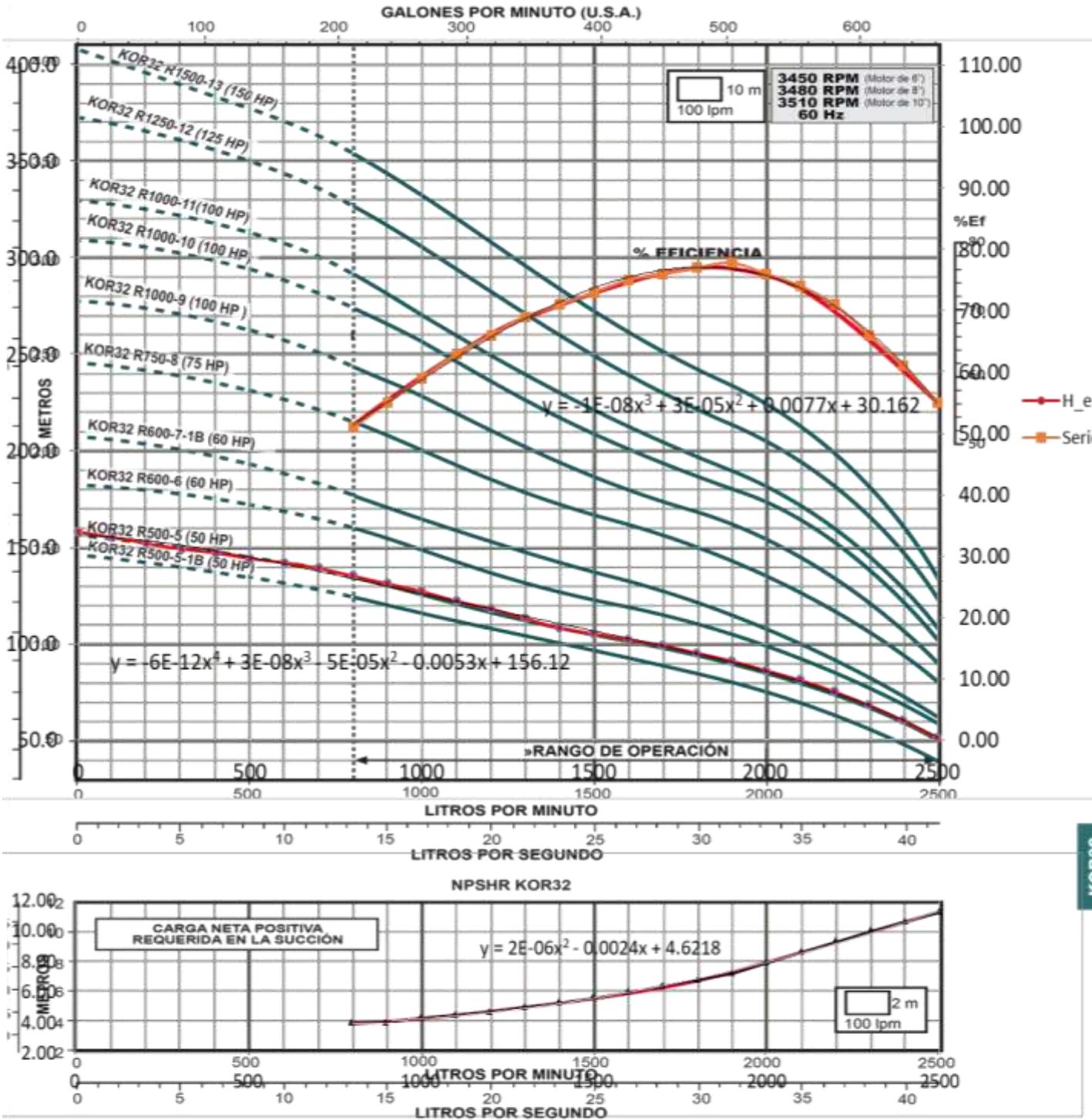
Hora	Demanda	Consumo
	[kW]	[kWh]
10:23	44.3	44.3
11:23	44.4	44.4
12:24	44.4	44.4
13:24	44.4	44.4
14:24	44.4	44.4
15:25	44.4	44.4
16:25	42.7	42.7
17:26	43.0	43.0
18:26	43.0	43.0
19:27	43.6	43.6
20:27	43.7	43.7
21:28	43.9	43.9
22:28	43.9	43.9
23:29	44.2	44.2
00:29	44.4	44.4
01:30	44.4	44.4
02:30	44.4	44.4
03:31	43.9	43.9
04:31	42.5	42.5
05:32	41.4	41.4
06:32	40.6	40.6
07:33	41.4	41.4
08:33	43.9	43.9
09:34	44.2	44.2
consumo/día		1,045.4

Por tal motivo se tiene que de la bomba un consumo de 381,563.7 [kWh/ año] y con la tarifa 6 de CFE se tiene un costo de \$ 695,032.4 [\$/año].

3.5.Propuesta

La eficiencia de la bomba actual se encuentra fuera del rango de operación recomendado por el fabricante el cual se haya entre 225 y 425 [GPM]; es evidente que el gasto demandado por el poblado es mayor al que brinda la bomba actual y debido a la variación en la carga, la bomba se encuentra cavitando todo del tiempo. Adicionalmente la bomba opera fuera del rango recomendado por la NOM-010-ENER-2004 en donde se recomienda como eficiencia mínima 71%. Por estas razones se recomienda una bomba que opere con mayor gasto y en el rango eficiente recomendado por el fabricante.

Se ha seleccionado una bomba con motor de alta eficiencia de la marca Altamira, serie KOR 32 con potencia demandada de 50 hp cuyas curvas características corresponden a las mostradas en la Figura 3-8.



» Trabajar fuera del rango de operación ocasiona alto consumo de energía y daño mecánico en la motobomba.

Figura 3-8.- Curvas características de bomba propuesta

En la Figura 3-8 se observan junto con las curvas características de carga y eficiencia, las curvas digitalizadas que fueron obtenidas como en la sección 3.2 y 3.4. La Figura 3-9 muestra los ajustes correspondientes junto con las curvas del sistema de bombeo de agua, tanto para la bomba actual como para la propuesta bajo un régimen eficiente. Para lo cual se tiene:

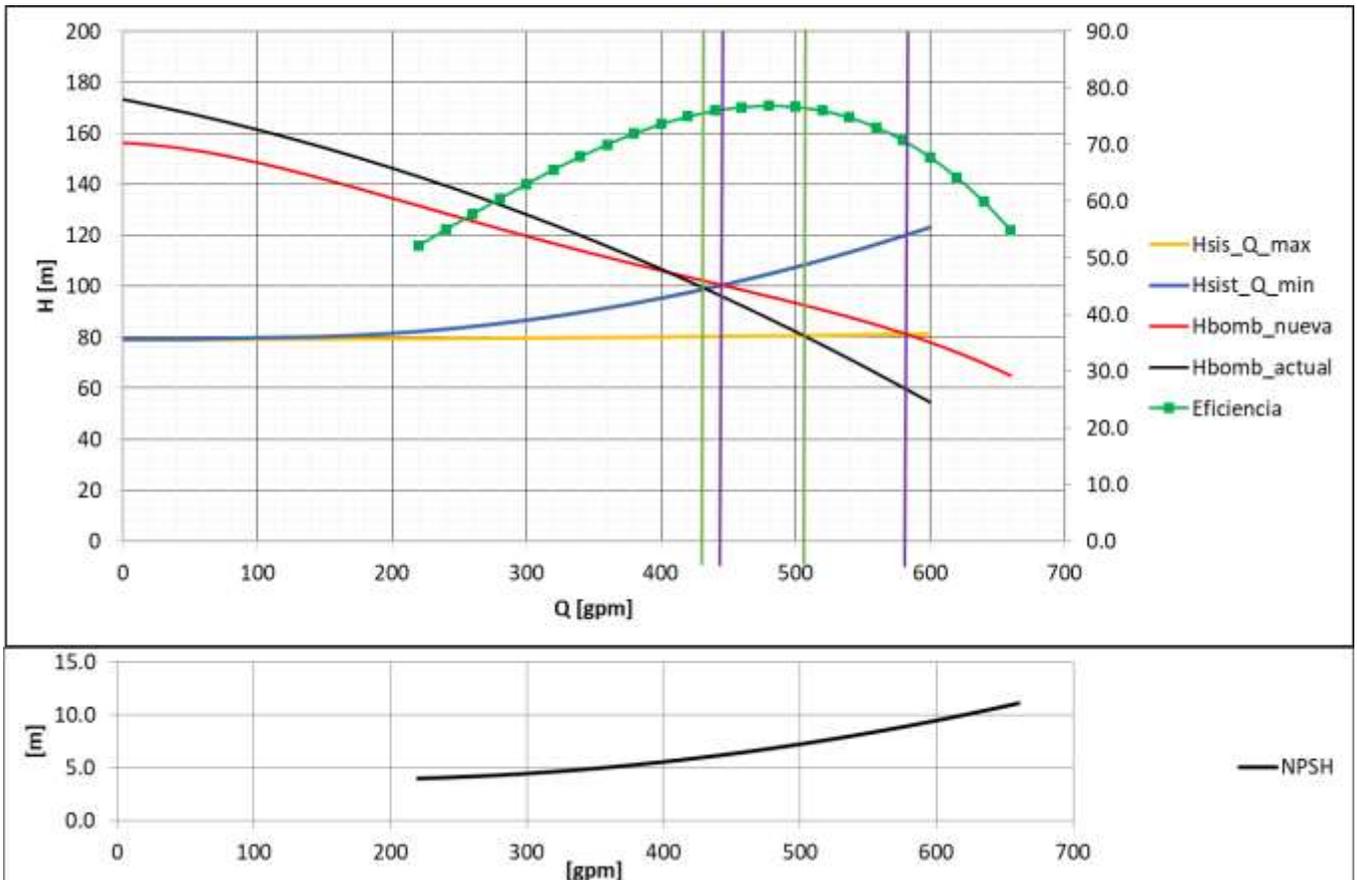


Figura 3-9.- Curvas características de bomba propuesta

En la gráfica anterior es observable que el equipo propuesto se encuentra en mejores condiciones de operación y se adecúa de mejor manera al requerimiento del poblado rural i.e., operando en mejor rango de eficiencia $\eta_{@Q_{min}=440[GPM]} = 75.9\%$ y $\eta_{@Q_{max}=584[GPM]} = 70.1\%$. Adicionalmente, para evitar la variación de gasto debida a la pérdida o ganancia de carga en las líneas de distribución, se recomienda agregar una válvula de globo con el fin de estrangular el flujo y mantener la presión a la salida de la bomba y así evitar que la bomba se deteriore debido a cavitación. Es de esperar que con el gasto incrementado la

curva del sistema ya no se abata como en el caso actual, pero el agregado de la válvula reduce un poco el gasto que se entregará.

Con relación al $NPSH_{requerido}$, el cual se obtiene de la curva característica del equipo de bombeo (Figura 3-9), en este caso es de $NPSH_{req@Q_{Min}} = 6.2$ [m] y de $NPSH_{req@Q_{Max}} = 9.1$ [mca]. Al compararlos con el $NPSH_{@Q_{max}}$ disponible = 24.20 [m] (en el caso más adverso) se cumple que $NPSH_{disp} > NPSH_{req}$ con lo que se previene el daño a la bomba al no existir cavitación aun cuando el sistema pierda carga.

Con la medida de instalar la válvula para estrangular el flujo y con ese fin asegurar que éste no rebase un flujo máximo, se evitaría la variación del flujo y carga de la bomba. Se establece entonces como rango de operación en el que operará la bomba el correspondiente al mostrado en la Tabla 3-7:

Tabla 3-7.- Características de operación de nueva bomba

	Q [gpm]	H [m]	Eficiencia [%]	$NPSH_{requerido}$ [m]
$Q_{@Min}$	440	101	75.9	6.2
$Q_{@Max}$	584	81	70.1	9.1

Para establecer el punto de operación más adecuado se realiza la siguiente evaluación con respecto al gasto, eficiencia y potencia al freno:

Tabla 3-8.- Análisis de operación

	Q [gpm]	H [m]	Efi [%]	Pot [kW]	BHP [kW]
1.- $Q_{@min}$	440	101	76	28	36
2.- $Q_{@BEP}$	480	96	77	29	37
3.- $Q_{@NOM}$	577	82	71	29	41
4.- $Q_{@max}$	584	81	70	29	42

Se observa que al operar la bomba:

- En el primer punto se tiene una eficiencia bastante aceptable sin embargo el gasto sería 2% menor con respecto al BEP;

- Con respecto al punto 2 de operación es el mejor punto de operación (BEP) recomendado por el fabricante, aunque con respecto al punto 1 sube una unidad en eficiencia;
- El tercer punto se refiere al punto de mínimo cumplimiento con la NOM-010-ENER-2004 y con respecto al BEP, se tiene un 20.2 [%] de aumento en el flujo de agua;
- El cuarto punto se refiere al mínimo punto en que pudiera operar el sistema con la bomba nueva, y aunque este punto no cumple con la NOM-010-ENER-2004 por estar su eficiencia un punto por debajo, se tiene un aumento de 21.7 [%] de gasto respecto al del BEP.

Es claro que para el poblado rural es de mayor conveniencia que la bomba opere en el punto número cuatro puesto que se obtiene mayor beneficio en cuanto al flujo de agua, sin embargo, se estaría sacrificando la demanda eléctrica ya que se estaría demandando la energía máxima (42 [kW]) lo que implica 12.2 [%] más que la demanda en el BEP.

3.6. Análisis económico

Estimando un comportamiento similar de la bomba propuesta con el equipo actual que se encuentra operando 24 horas los 365 días del año, se tiene un consumo energético de 338,007.4 [kWh/año]. La figura 3-10, muestra la demanda para este caso. Tomando el costo establecido por CFE de la tarifa 6 de ese año se tiene un costo energético \$616,432.4 [\$/año]. Ahora de la propuesta con respecto al equipo actual se tiene un ahorro por 78,600.0 [\$/año].

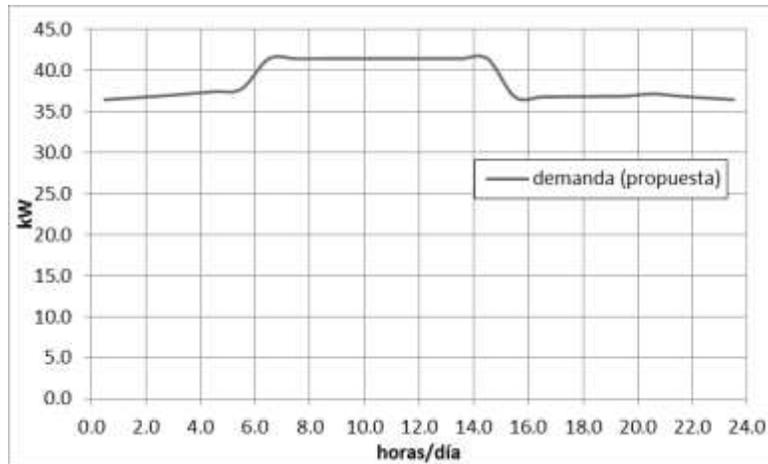


Figura 3-10.- Consumo de la bomba propuesta

El costo estimado por inversión más instalación de la nueva bomba es de \$99,191.0 IVA incluido, el motor \$52,499.0 IVA, y la válvula e instalación costarían \$12,180.0, de tal manera que el periodo de retorno de la inversión es de 2.1 [años], mientras que el tiempo posterior sería de recuperación para el municipio.

A continuación se muestra la bomba propuesta al momento de su llegada para instalación (Figura 3-11).



Figura 3-11.- Muestra de envío de bomba

El proyecto termina con la puesta en marcha de la bomba, motor y válvula propuestos con el fin de generar ahorro para el municipio de Juchitán. Oaxaca.

CAPÍTULO 4

Multis itineribus Romam ducunt, sed as res ... Euge!!!

4.1. Conclusiones.

La eficiencia energética es sinónimo de aprovechamiento máximo de la energía con el fin de cumplir su propósito para el que fue diseñado. En el caso específico de una bomba de pozo profundo, ésta cumple cabalmente con su función cuando abastece el agua suficiente para su consumo, operando de forma eficiente y tratando de ser económico en cuanto a consumo energético. Se pudo observar que el equipo instalado por falta de buenas prácticas opera(ba) de forma ineficiente ($\eta_{@Q_{max}} = 60.4$ [%]) la mayor parte del tiempo, operando 10.6 puntos porcentuales por debajo de la recomendación que hace la NOM-010-ENER-2014 para este tipo de bombas,

El análisis de cavitación aplicado al rango de gastos (fuera del recomendado por el fabricante) $426 < Q[\text{GPM}] < 506$ determinó que el $\text{NPSH}_{\text{requerido}}$ 26.05[m] y 30.65[m] para los gastos mínimo y máximo, respectivamente, es mayor que el $\text{NPSH}_{\text{disponible}}$ ($@Q_{min} = 26.03$ [m] y $@Q_{max} = 24.20$ [m]) por lo que la bomba cavita durante su operación.

Al aplicar el diagnóstico energético sobre el sistema hidráulico estableciendo los límites desde la succión vertical hasta la tubería exterior horizontal antes de ir bajo tierra, se obtuvo que el sistema opera con irregularidades y con base en los resultados obtenidos se sugirió la necesidad de sustituir el conjunto motor-bomba, buscando tanto una mejora en el gasto entregado como en un mejor aprovechamiento de la energía.

Al aplicar un análisis con la bomba propuesta se lograron mejorar los siguientes conceptos:

- ✚ Gasto En términos de gasto entregado la nueva bomba operaría en un rango mayor, $441 < Q [\text{GPM}] < 584$, i.e., con un incremento entre 3.5% y 11.12% respecto a la anterior, haciendo el señalamiento de que operaría mayormente a la derecha del BEP.
- ✚ Eficiencia: El rango de operación del equipo propuesto quedaría entre una eficiencia del 75.9% para el gasto mínimo, y de 70.1% para el máximo 441[GPM] y 584[GPM], respectivamente. Se identificaron 4 puntos dentro de

este rango, los dos mencionados más el del BEP ($\eta @BEP = 77$ [%]), y el del asociado al valor de mínima eficiencia requerido por la NOM-010-ENER-2004, esto es $\eta @NOM10 = 71$ [%]. Se pudo identificar que la bomba podría estar operando fuera del valor de la NOM, pero aun en ese caso se recomienda se utilice.

- ✚ Demanda y Consumo: En cuanto al primer concepto la demanda máxima disminuye marginalmente (2 kW), pero en el consumo se logran obtener un ahorro significativo, 43,556.3 [kWh/año] que representa un ahorro del 12.9%, con la ganancia ya mencionada en GPM's.
- ✚ Costos: Los costos asociados a esta propuesta dieron los siguientes resultados, una inversión inicial total de \$163.870.00, y con los ahorros calculados de \$78,600.0 [\$/año], da un periodo de recuperación de la inversión de 2.1 años, es decir, es un proyecto rentable.
- ✚ Indicadores energéticos: El análisis realizado en esta tesis permite observar las ventajas que se obtienen al realizar una evaluación de aprovechamiento de la energía como la oportunidad de ahorro obtenido en esta situación, así mismo de las posibles oportunidades de ahorro económico. Llevar la operación de ciertos equipos al BEP suele generar beneficios al usuario, adicionalmente las buenas prácticas de operación y mantenimiento (BID, 2011) hacen que los equipos aprovechen mejor la energía y de esa manera subir la eficiencia de los mismos equipos, en este caso se obtienen beneficios que repercuten en consumo energético que se puede interpretar como ahorro económico en cuanto a energía facturada.

Se pueden incluir en este trabajo dos conceptos: la intensidad energética incluyendo el costo de la energía en lugar de la energía misma relacionada con el producto (agua bombeada), con un valor de 0.0029 [\$/galón bombeado] para el sistema anterior, contra 0.0023 [\$/galón bombeado], lo que refleja el beneficio económico del proyecto.

Se comentó en el párrafo sobre la eficiencia de que se recomienda trabajar inclusive fuera del rango de la NOM-010-ENER-2004, para tal efecto se recurre

al indicador energético “relación de eficiencia energética de bombeo (REEB)” definido como el producto entregado entre la potencia demandada. En estas condiciones se tiene los datos mostrados en la tabla 4-1.

Tabla 4-1.- REEB

punto de operación	Q [GPM]	BHP [kW]	REEB [-]	η [%]	ΔQ [%]	$\Delta \eta$ [%]
Q_ _{@min}	440	36.24	12.14	75.90	-8.33	-1.16
Q@BEP	480	37.13	12.93	76.79	0.0	0.0
Q_ _{@NOM}	577	41.24	13.99	71.07	20.21	-7.45
Q_ _{@max}	584	41.67	14.02	70.14	21.67	-8.65

En la tabla se puede notar que el claramente el REEB mayor corresponde al punto de $Q_{\text{máx}}$, con una ganancia de 21.67% respecto al proporcionado por el BEP, con solamente -8.65% de pérdida de eficiencia. El punto se encuentra en la zona recomendada por el fabricante. Luego entonces es deseable si se da la circunstancia, dejar que la bomba opere en ese punto. La recomendación final entonces implica regular la presión de manera que se obtenga la eficiencia mínima permitida (71%), o el gasto máximo posible.

Bibliografía

- ABB. (2013). *Novedades en innovación* . 68.
- BID. (2011). *EVALUACIÓN PARA SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA*. Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Climático, I. d. (2011). *Evaluación de sistemas de bombeo de agua Manual de eficiencia energética*. Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Hicks, T. G. (1990.). *Bombas, su selección y aplicación*. México,: CECSA.
- IMTA. (10 de sep de 2015). *ECUACIÓN UNIVERSAL PARA EL CÁLCULO DE PERDIDAS EN REDES DE AGUA POTABLE*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/266465312_ECUACION_UNIVERSAL_PARA_EL_CALCULO_DE_PERDIDAS_EN_REDES_DE_AGUA_POTABLE
- LEDERLE Hermetic. (2010). *Information NPSH*. HERMETIC-Pumpen GmbH. Obtenido de https://www.hermetic-pumpen.com/system/assets/405/Info_NPSH_ES_08_2010.pdf
- NOM-001-ENER. (06 de 08 de 2014). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5355493&fecha=06/08/2014
- NOM-006-ENER. (21 de 05 de 2015). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5393140&fecha=21/05/2015
- NOM-010-ENER. (18 de 04 de 2004). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2033456&fecha=18/04/2005
- ROMERO CASTRO, I. (2007). *COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO EN MODELO REDUCIDO DE TÚNELES DE SECCIÓN PORTAL TRABAJANDO A PRESIÓN CON RUGOSIDAD COMPUESTA*. México: FACULTAD DE INGENIERÍA, TESIS, MAESTRO EN INGENIERÍA (HIDRÁULICA).

RUNSA. (2008). Programa de capacitación: sistemas de enfriamiento, conceptos basicos de la bomba. México: RUNSA.

SENER. (10 de 2016). *Secretaría de Energía* . Obtenido de <http://www.energie.gob.mx/portal/default.aspx?id=2617>

Universidad Nacional de Ingeniería. (s.f.). Dinámica de carga en tuberías. En J. M. Damian, *Mecánica de Fluidos*. mexico.

ZUBICARAY, M. V. (2000). *BOMBAS TEORIA; DISEÑO Y APLICACIONES*. México: LIMUSA.

Apéndice 1

Promocional y Homologado de Certificación de Analizador de Redes.

Analizadores de Redes Eléctricas Profesionales

NOVEDAD

Para la calidad de la red Eléctrica según EN50160

PQA

POWER QUALITY ANALYZER



PQA 824
Cable HT 0100

PQA 823
Cable HT 0100

NOVEDAD

HT

TUV SÜD

www.htinstruments.com

HT

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES:

- Visualización en forma numérica y gráfica
- Diagramas vectoriales Tensión/Intensidad
- Análisis armónicos hasta 40ª y THD% de V e I
- Perturbaciones de Red (Huecos y picos)
- Análisis del Flicker según EN50160
- Análisis Asimetría de V según EN50160
- Análisis Transitorios (Spikes)
- Medida de registro corriente de pico de motores
- Pantalla TFT Color Táctil
- Ayuda en pantalla
- Etc...



DICHIARAZIONE DI CONFORMITA'
DECLARATION OF CONFORMITY



Marcatura CE
CE Mark

Nome del fabbricante: **HT ITALIA srl**
Manufacturer's name:

Indirizzo del fabbricante: **Via della Boaria 40**
Manufacturer's address: **48018 Faenza (RA)**

Dichiara che il prodotto **Nome del prodotto: Power Quality Analyzer**
Declares, that the product **Product name:**

Modello: PQA824
Model number:

Data:
Date:

Opzioni:
Product options:

E' stato fabbricato conformemente alle specifiche tecniche del prodotto ed è in tutto e per tutto conforme alle norme e specifiche vigenti, in particolare:
Has been manufactured to the technical specifications of the product and conforms in all respects to the relevant standards regulations in force and especially to:

Sicurezza:
Safety:

EN/IEC61010-1 + EN/IEC61010-031 + EN/IEC61010-2-032
Isolamento: doppio isolamento
Grado di inquinamento: 2
Cat. di misura (@ altitudine<2000m): CAT IV 660V (verso terra)
max 1000V tra gli ingressi

EN/IEC61010-1 + EN/IEC61010-031 + EN/IEC61010-2-032
Insulation: double insulation
Pollution degree: 2
Installation category (@ height <2000m):CAT IV 660V (to ground)
max 1000V between inputs

Compatibilità elettromagnetica:
Electromagnetic compatibility:

EMC secondo EN61326(1997) +A1(1998) +A2(2001)

EMC according to EN61326(1997) +A1(1998) + A2(2001)

Il prodotto summenzionato è conforme ai requisiti della direttiva europea bassa tensione (LVD) 2006/95/CEE ed alla direttiva compatibilità elettromagnetica (EMC) 2004/108/CE
The product herewith complies with the requirements of the low voltage directive (LVD) 2006/95/EEC and the electromagnetic compatibility directive (EMC) 2004/108/EEC

Faenza ITALIA



Il direttore tecnico
Technical Manager
N. Scuro

Via della Boaria 40 48018 - Faenza (RA) - Tel:+39-0546-621002 (4 linee r.a.) - Fax:+39-0546-621144 - email: ht@htitalia.it - <http://www.htitalia.com>

Apéndice 2

Promocional de certificación de cámara Termográfica.

FLUKE

Ti450, Ti400 and Ti300 Infrared Cameras The Fluke Professional Series



SUPERIOR IMAGE QUALITY

SPATIAL RESOLUTION
Ti450 and Ti400
1.31 mRad

Ti300
1.75 mRad

RESOLUTION
Ti450
320 x 240
SuperResolution mode: 640 x 480

Ti400
320 x 240

Ti300
240 x 180

FIELD OF VIEW
Ti450, Ti400, Ti300
24° 41 x 17° 41



Fluke Connect® compatible

Focus redefined.

- 100% Focused—With **MultiSharp™ Focus**, simply point and shoot—the camera automatically processes a stack of images focused near and far to produce one image with every object in focus (Ti450)
- Get an instant in-focus image of your designated target. **LaserSharp® Auto Focus**, exclusive to Fluke, uses a built-in laser distance meter that calculates and displays the distance from your designated target with pinpoint accuracy
- Get 4x the pixel data with **SuperResolution**, which captures multiple images and combines them to create a 640 x 480 image (Ti450)
- Save time—wirelessly sync images directly from your camera to the **Fluke Connect® system**, and attach to an asset record or work order. Having access to maintenance records simultaneously at the inspection site and from the office or an off-site location enables faster decision making and real time collaboration between team members
- **Get the context** of the visual and infrared details all in one precisely blended or picture-in-picture image with **IR-Fusion®** technology
- **See the details you need** with interchangeable smart lenses—2x and 4x telephoto and wide angle—no calibration required

100% Focused—Every object. Near and far. **MultiSharp™ Focus**.



Manual Focus



MultiSharp™ Focus, available on the Ti450.

Apéndice 3

Homologado de certificación de medidor de flujo ultrasónico.

8/9/2016

Flujómetro Ultrasónico Portatil | Flujómetros | Flujo | INSTRUMENTACION

Flujómetro Ultrasónico Portatil | Flujómetros | Flujo | INSTRUMENTACION

FLUJOMETRO ULTRASONICO PORTATIL



APLICACION	MODELO	TECNOLOGIA	MARCA	
Flujo	TTFM100B-HH-B-NG	DN 50 to DN 6000	BM Technologie Industriale	
FUNCION			CODIGO	SECCION
Flujómetro Ultrasónico Portatil.			11-1013	11

Technical Features

High accuracy measuring: Linearity: better than 0.5% - Repeatability: better than 0.2%, - Accuracy: better than $\pm 1\%$.

Wide measuring range With CLAMP-ON SENSORS: Three types of clamp-on sensors for size from DN15-100, DN50-10000, DN300-6000, no pressure drop, no pipe disturbance.

Italian, French or English menu: TTFM100A/2009 NEW GENERATION can support Italian, French or English display, easy to operate, in the near future other languages will be implemented.

Large Capacity Battery and Power Supply: 3 AAA Built-in rechargeable NI-MH battery, provide over 12 hours continuous operation. Charger 100-240 VAC adapter.

Grade of Protection: IP20 handled unit; IP20 Clamp-On Sensors with BNC connectors.

Output: RS232 to download the stored data by Hyperterminal free software.

Large LCD Display: 4x16 Digits, displaying Instantaneous flow, Total Flow (Positive, Negative and Net), Velocity, Working Status etc.

Data Logger: Built-In 24 K Data Logger can store over 2000 lines of data.

Standard configuration: 1 Handled Unit; 2 Couples of clamp-on sensors; Transducers Cable; 2 Stretcher 3 mt; 1 Data Line; 1 Power Cord; 1 Carrying Case.



Main Features

The TTFM100/2009 N.G. series includes a range of flow meters whose electronics is composed of a single

Apéndice 4

Homologado de manómetros digitales.

Pressure / Process Calibration Equipment

Additel 681 Digital Pressure Gauges



Absolute Pressure					
P/N	Pressure Range		Media M	Accuracy(%FS)	Burst Pressure
	(psi)	(bar)			
AP5	5	0.35	G	0.1 (0.2)	3x
AP10	10	0.7	G	0.1 (0.2)	3x
AP15	15	1.0	G	0.1 (0.2)	3x
AP30	30	2.0	G	0.1 (0.2)	3x
AP50	50	3.5	G	0.1 (0.2)	3x
AP100	100	7.0	G, L	0.05 (0.1, 0.2)	3x
AP300	300	20	G, L	0.05 (0.1, 0.2)	3x
AP500	500	35	G, L	0.05 (0.1, 0.2)	3x
AP1K	1,000	70	G, L	0.05 (0.1, 0.2)	3x
AP3K	3,000	200	G, L	0.05 (0.1, 0.2)	3x
AP5K	5,000	350	G, L	0.05 (0.1, 0.2)	3x

[1] G=Gas, L=Liquid

Differential Pressure						
P/N	Pressure Range		Media	Accuracy (%FS) ^[1]	Burst Pressure	Static Pressure Range
	(inH ₂ O)	(mibar)				
DP1	±1	±2.5	G	0.05 ^[1]	100x	±10 psi
DP2	±2	±5.0	G	0.05 ^[1]	100x	±10 psi
DP5	±5	±10	G	0.05 ^[1]	50x	±10 psi
DP10	±10	±25	G	0.05 ^[1]	20x	±10 psi
DP20	±20	±50	G	0.05	20x	±10 psi
DP30	±30	±75	G	0.05	20x	±10 psi
DP50	±50	±160	G	0.05	3x	±10 psi
DP150	±150	±350	G	0.02 (0.05)	3x	50 psi
DP300	±300	±700	G	0.02 (0.05)	3x	50 psi

[1] FS specification applies to the span of the range. Accuracy includes one year stability.

[2] 0.05%FS accuracy (incl 6 months stability). One year accuracy is 0.05%FS calibration accuracy combined with 0.05%FS one year stability.

Compound Pressure ^[1]						
P/N	Pressure Range		Media M	Accuracy		Burst Pressure
	(psi)	(bar)		%FS ^[1]	%RD	
CP2	±2	±0.16	G	0.05 (0.1,0.2)	N/A	3x
CP5	±5	±0.35	G	0.02 (0.05,0.1,0.2)	0.1	3x
CP10	±10	±0.7	G	0.02 (0.05,0.1,0.2)	0.1	3x
CP15	±15	±1	G	0.02 (0.05,0.1,0.2)	0.1	3x
CP30	-15 to 30	-1 to 2	G	0.02 (0.05,0.1,0.2)	0.1	3x
CP100	-15 to 100	-1 to 7	G, L	0.02 (0.05,0.1,0.2)	0.1	3x
CP300	-15 to 300	-1 to 20	G, L	0.02 (0.05,0.1,0.2)	0.1	3x

[1] Sealed gauge pressure for above 1,000 psi.

[2] G=Gas, L=Liquid

[3] FS specification applies to the span of the range.

ORDERING INFORMATION



Model Number

ADT681 - 02 - GP300 - PSI - N - PB - DL

Model:
ADT681
ADT681IS

Range type:
PSI-range by psi
BAR-range by bar
H₂O-range by inH₂O

Accuracy:
02-0.02% of full scale
05-0.05% of full scale
10-0.1% of full scale
20-0.2% of full scale
RD-0.1% of reading

Pressure port type:
N- 1/4NPT male
N2- 1/2NPT male
B-1/4BSP male
B2-1/2BSP male
M-M20X1.5 male
AF-Autoclave F-250-C female
AM-Autoclave M-250-C male

Pressure range P/N:
See pressure range table

PB: Panel mount with back pressure port

DL: Data logging

Accessories included

- Rubber boot (Except panel mount)
- 9V alkaline battery (1 pc)
- Manual
- NIST traceable calibration certificate

Optional Accessories

Model number	Description
9812	110V/220V external power adapter (DC 9V) for 681 digital pressure gauge.
9502	AdditelLog II real time data logging and graphical software for 681 and 672.
9506	Additel/PCal pressure calibration software
9050	USB to RS232 (DB9/M) Adapter
9900-681	Carrying Case for one 681 digital pressure gauge
9251	Rubber boot for ADT681

Note: For oil-free applications contact Additel.

03

Phone: 714-998-6999 Fax: 714-998-6999 Email: sales@additel.com

Corporate Headquarters
2900 Saturn St #B
Brea, CA 92821, USA

Salt Lake City Office
1364 West State Rd, Suite 101
Pleasant Grove, UT 84062, USA