

Artículo de Divulgación C. y Tecnológica**DETERMINACION DE CURVAS DE OPERACIÓN DE BOMBAS****Por Ing. José Cruz Toledo Matus**

Se plantea el procedimiento para lograr la determinación de las curvas de operación de bombas. El equipo constó de un tanque de abastecimiento de agua, una electro-bomba intercambiable, un tanque volumétrico para medir caudal (Q), un juego de manómetro (en la descarga) y vacuómetro (en la succión) para medir la carga dinámica total (Hm), y una válvula calibradora para variar los parámetros hidráulicos del sistema (Q y Hm). La medición del caudal y la presión permitieron obtener la potencia hidráulica (Ph) desarrollada por el sistema. La potencia eléctrica consumida fue medida mediante un medidor convencional de corriente eléctrica. Los datos provenientes de la operación del sistema permitieron obtener las curvas Hm vs. Q, Ph vs. Q y las curvas de eficiencia de bombeo.

INTRODUCCIÓN

La imperiosa necesidad de disponer en los laboratorios de las instituciones educativas de un equipo que permita el adiestramiento del estudiantado de las carreras de ingeniería mecánica y electromecánica, en lo concerniente a los principios básicos de bombeo hidráulico y el funcionamiento óptimo de las bombas, hizo que nos motivara a buscar la activación de un banco de bombas que por años había estado fuera de servicio por muchas razones.

El propósito fundamental era investigar el comportamiento hidrodinámico de las bombas montadas sobre un banco de pruebas, para ello se procedió a operar las bombas y a recopilar los datos experimentales que se obtenían. Se efectuaron una serie de corridas a diferentes cargas y caudales. Se analizaron los datos logrados y se les dio la interpretación correspondiente. Se calcularon otros parámetros de bombeo a partir de estos primeros y se determinaron las curvas de operación por el método estadístico de regresión.

Un banco de prueba o una cama hidráulica, permite ver cómo se manejan los fluidos a través del impulso que le

dan los equipos rotatorios y proporciona el apoyo necesario para comprender un alto rango de modelos hidráulicos, cada uno diseñado para demostrar un aspecto particular de la teoría hidráulica.

Esta investigación de tipo experimental, se desarrolló en el Laboratorio Electromecánico del Instituto Tecnológico del Istmo, en Juchitán Oaxaca. En el mencionado laboratorio se encuentra un banco de bombeo, de la marca "BFG Internacional S.A." que había estado inactivo sin que despertara el interés de alguien por hacerlo operar. Razones son muchas y entre ellas se mencionan, la falta del manual de operación del equipo; la constancia de entrega oficial del equipo por parte del fabricante y la recepción del mismo con todos sus componentes incluyendo manuales y certificados de garantías, a la institución.

En el diseño de este trabajo se consideró dividir el contenido en cinco capítulos. En el primero se presenta las generalidades pertinentes al funcionamiento de las bombas y sus curvas de operación así como los datos básicos hidrodinámica.

En el siguiente capítulo se describe el sistema a analizar, su diseño y capacidad de prueba. Fue necesario ocupar un capítulo, el cuarto, para presentar las necesidades de evaluación

y pruebas de bombeo como practica demostrativa. Se demuestra con cálculos y formulas los datos tabulares.

En el capítulo cinco se analizan los datos y se discuten los resultados y eficiencia de la operatividad del banco de prueba. Se finaliza con algunos aspectos que tiene que ver con la seguridad en la operabilidad del equipo.

Cabe mencionar que los cálculos, tablas y graficas que aquí se incluyen fueron realizados con el apoyo del software llamado Mathcad 2001.

GENERALIDADES

Por ser las bombas los elementos primordiales en un banco de prueba de bombeo y por ser las curvas de funcionamiento las que gráficamente muestran la eficiencia del equipo electromecánico; se ha considerado necesario referirnos primeramente a las bombas y sus características en cuanto a su función mecánica y finalmente el comportamiento físico mostrado con la curvas de operación.

1.1 Principio y Funcionamiento de las bombas

Un equipo de bombeo es un transformador de energía mecánica que puede provenir de un motor eléctrico, térmico, etc. Y la convierte en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de altura de posición y de velocidad de flujo.

De ahí que se tienen bombas cuya función consiste en cambiar la altura de posición de un cierto fluido. Por ejemplo la bomba de pozo profundo, que adiciona energía para que el agua del subsuelo se eleve a la superficie.

Un ejemplo de bombas que adicionan energía de presión sería una bomba en un oleoducto, en donde los

diámetros de tuberías y consecuentemente las velocidades fuesen iguales, y no tuviesen que elevarlo, sino que la presión fuese incrementada para poder vencer las perdidas de fricción que se tuviesen en la conducción.

Existen bombas que trabajan con presiones y alturas de carga iguales que únicamente adicionan energía de velocidad. Sin embargo a este respecto hay muchas confusiones en los términos presión y velocidad por la acepción que llevan implícita de las expresiones fuerza-tiempo. En la mayoría de las aplicaciones de energía conferida por la bomba es una mezcla de las tres (presión, velocidad y altura). Las cuales se comportan de acuerdo con las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos, y específicamente la ecuación de Bernoulli.

Lo inverso a lo que sucede en una bomba es cuando se tiene una máquina llamada comúnmente turbina, la cual transforma la energía de un fluido en energía mecánica.

Para una mayor claridad, buscando una analogía con las máquinas eléctricas, y para el caso específico del agua, una bomba sería un generador hidráulico, en tanto que una turbina sería un motor hidráulico.

Normalmente un generador hidráulico (bomba) es accionado por un motor eléctrico, térmico, etc. mientras que un motor hidráulico (turbina) acciona un generador eléctrico.

Tratándose de fluidos compresibles el generador suele llamarse compresor y el motor puede ser

una turbina de aire, gas o simplemente un motor térmico.

Existe una diversidad de clasificación de bombas que ocasionalmente puede causar confusión al intentar ubicarlas dentro de un cierto tipo, clave u otra distinción, sin embargo la más adecuada para propósitos de este trabajo es la proporcionada por el Instituto de Hidráulica ("Hydraulic Institute") de los E.E.U.U.

Esta clasificación toma en cuenta la forma cómo el fluido se desplaza dentro de los elementos de la bomba, así para aquellos en los que el fluido se desplaza a presión dentro de una carcasa cerrada, como resultados del movimiento suavizada de un pistón o embolo, se le denomina "bombas de desplazamiento positivo", mientras que las bombas en las cuales el fluido es desplazado por el movimiento circular de uno o varios impulsores provistos de alabe, se les denomina "Bombas Centrifugas" y es en el presente trabajo a estas últimas a las que se hará referencia.

1.2 Curvas de operación de las bombas

A diferencia de las bombas de desplazamiento positivo, una bomba centrífuga que opera a velocidad constante puede descargar cualquier capacidad desde cero a un valor máximo que depende del tamaño de la bomba, diseño y condiciones de succión. La carga total generada por la bomba, la potencia requerida para moverla y la eficiencia resultante varían con la capacidad o caudal manejado.

Las interrelaciones de capacidad (Q), carga total hidrostática (H), potencia (P) y la eficiencia (η) se denominan parámetros característicos de la bomba. Estas interrelaciones se muestran mejor gráficamente, y la grafica obtenida se llama curva de operación de la bomba. La carga, fuerza y eficiencia generalmente se trazan contra la capacidad a velocidad constante, como se muestra en la figura1, donde se muestran las tres curvas características de operación de la bomba.

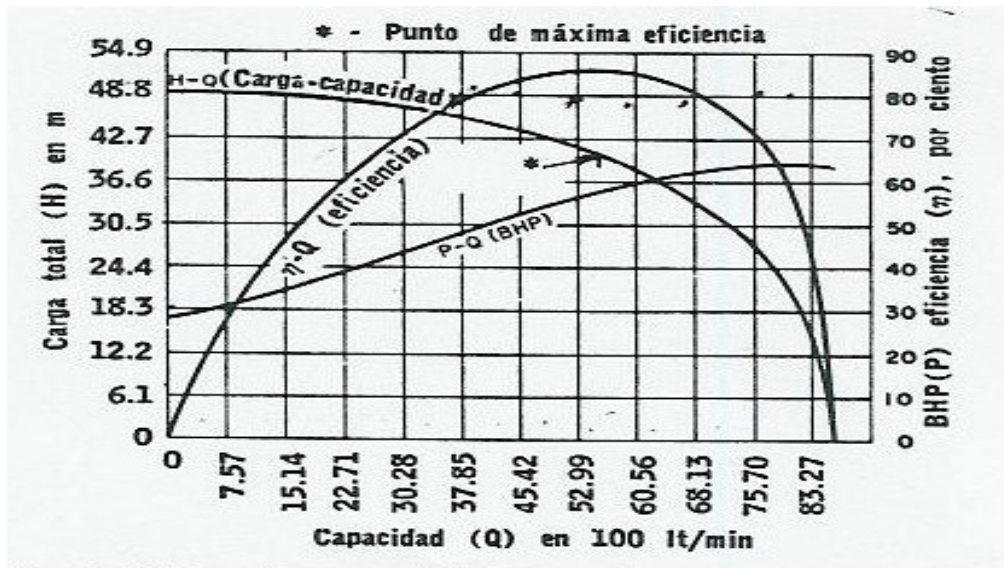


Figura 1 curvas características de bombas centrífugas

Es posible para problemas especiales, trazar cualquiera de las tres contra un cuarto componente cualquiera. Cuando se usan impulsores de velocidad variable, se incluye un quinto componente, la velocidad de operación de la bomba expresada en RPM.

Cuando las consideraciones de succión pueden ser críticas, la curva límite de elevación de succión contra capacidad, o la curva de requerimiento de NPSH contra capacidad es la que se muestra con frecuencia. Muchas otras relaciones se pueden mostrar en la misma grafica según lo requieran estudios especializados, por ejemplo, la velocidad específica trazada contra la capacidad.

La curva H-Q en la figura 1, que muestra la relación entre la capacidad (Q) y la carga total (H), se llama curva de carga-capacidad. Con frecuencia se clasifican las bombas basándose en las forma de sus curvas de carga-capacidad, como se describe más adelante.

La curva P-Q en la figura 1, muestra la relación entre la potencia (P) y la capacidad (Q) de la bomba, es la curva de potencia-capacidad; pero generalmente se refiere uno a ella como la curva de caballaje al freno, o la curva de BHP.

La curva η -Q en la figura 1, que muestra la relación entre la eficiencia (η) y la capacidad (Q), se llama propiamente la curva de eficiencia-capacidad pero comúnmente se llama la curva de eficiencia.

Generalmente, la grafica de característica de una bomba está hecha para una variación de capacidad de cero a la capacidad máxima de operación de la unidad. Las escalas en la graficas para carga, eficiencia y potencia al freno (BHP) tienen todas la misma línea de cero a la base de la grafica figura 1.

En algunos casos, la curva se hace para una variación limitada de capacidad. En otros casos, para permitir una presentación más clara, las escalas de carga eficiencia y fuerza se seleccionan de manera que no coinciden sus líneas de cero y algunas veces estas escalas se amplían tanto que su desarrollo total se puede ver en grafica.

METODO DE REGRESION

La interpretación de los datos obtenidos y resumidos en el Cuadro No. 1 condujo a la graficación de: capacidad o caudal (Q) contra la carga total (Hm); caudal (Q) contra la potencia hidráulica (P); y caudal (Q) contra la eficiencia (e); por medio de un análisis de datos aplicando el método de regresión, esto es con el fin de conocer la tendencia que muestra cada uno de los comportamientos de los tres caso experimentales de estudio.

La regresión es una técnica estadística utilizada para simular la relación existente entre dos o más variables. Por lo tanto se puede emplear para construir un modelo que permita predecir el comportamiento de una variable dada.

La regresión es muy utilizada para interpretar situaciones reales, pero comúnmente se hace de mala forma, por lo cual es necesario realizar una selección adecuada de las variables que van a construir las ecuaciones de la regresión, ya que tomar variables que no tengan relación en la práctica, nos arrojará un modelo carente de sentido, es decir ilógico.

2.1 Ecuaciones de regresión

Según sea la dispersión de los datos (nube de puntos) en el plano cartesiano, pueden darse alguna de las siguientes relaciones, Lineal, Logarítmica, Exponencial, Cuadrática, entre otras. Las ecuaciones de cada

relación se presentan en la siguiente tabla.

Lineal: $Y = B + mX$

Exponencial: $Y = A \cdot e^{(BX)}$

Logarítmica: $Y = A + B \cdot \ln(X)$

Cuadrática: $Y = A + B \cdot X + C \cdot X^2$

Sin embargo obtener el modelo de regresión no es suficiente para establecer la regresión, ya que es necesario evaluar que tan adecuado es el modelo de regresión obtenido. Para esto se hace uso del coeficiente de correlación R, el cual mide el grado de relación existente entre las variables.

El valor de R varia entre -1 y 1, pero en la práctica se trabaja con el valor absoluto de R, entonces, a medida que R se aproxime a 1, más grande es el grado de correlación entre los datos, de acuerdo con esto el coeficiente de correlación se puede clasificar de varias formas, como se observa en la siguiente tabla.

CORRELACIÓN	VALOR O RANGO
Perfecta	$ R = 1$
Excelente	$0.9 \leq R < 1$
Buena	$0.8 \leq R < 0.9$

Regular	$0.5 \leq R < 0.8$
Mala	$ R < 0.5$

Por lo tanto el análisis de regresión es una herramienta estadística que permite analizar y predecir o estimar observaciones futuras de dos o más variables relacionadas entre sí, es decir una herramienta útil para la planeación

2.2 Diagrama de dispersión

La primera forma de describir una distribución bivalente es representar los pares de valores en el plano cartesiano. El gráfico obtenido recibe el nombre de nube de puntos o diagrama de dispersión figura 2.1.

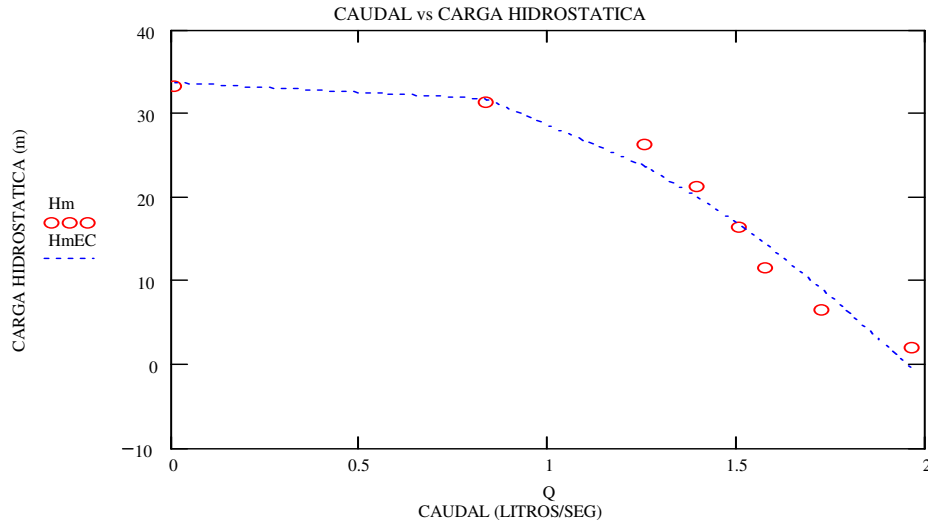


Figura 2.1. Nube de puntos o diagrama de dispersión

Un diagrama de dispersión es una representación gráfica de la relación entre dos variables, muy utilizada en las fases de comprobación de teorías e identificación de causas raíz y en el diseño de soluciones y mantenimiento de los resultados obtenidos. Tres conceptos especialmente destacables son que el descubrimiento de las verdaderas relaciones de causa-efecto es la clave de la resolución eficaz de un problema, que las relaciones de causa-efecto casi siempre muestran variaciones, y que es más fácil ver la relación en un diagrama de dispersión que en una simple tabla de números.

2.3 Línea de tendencia

La línea de tendencia es la herramienta básica más importante con la que cuenta el analista técnico.

Es una línea o conjunto de líneas que se trazan en el gráfico uniendo con una misma pendiente series sucesivas de puntos mínimos (línea de tendencia alcista) o de puntos máximos (línea de tendencia bajista).

Según sea la dispersión de los datos (nube de puntos) en el plano cartesiano, pueden darse alguna de las siguientes relaciones, Lineal figura 2.2, Logarítmica figura 2.3; Exponencial figura 2.4; Cuadrática, entre otros

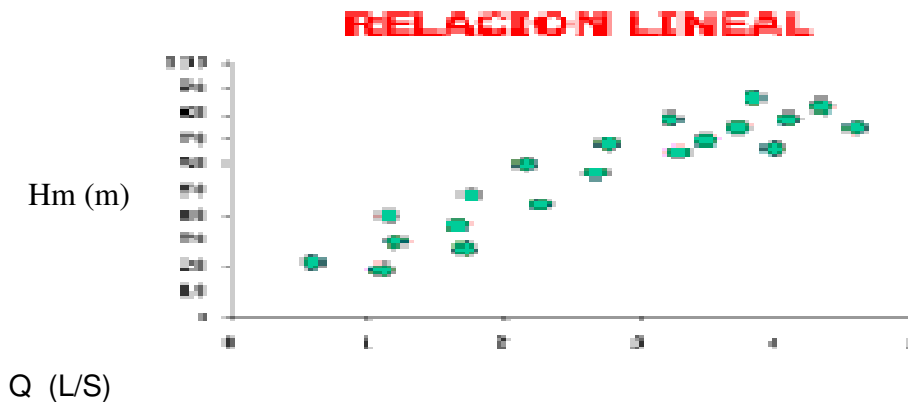


Figura 2.2 Datos con relación lineal.

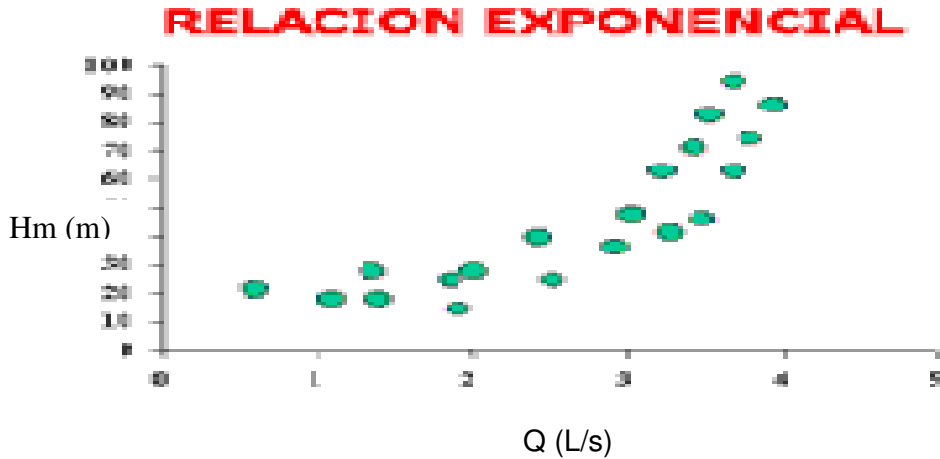


Figura 2.3 Datos con relación exponencial.

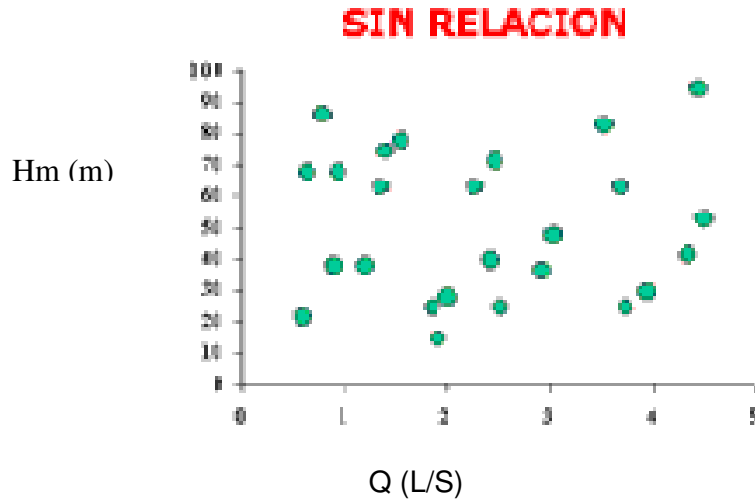


Figura 2.4 Datos sin relación.

2.4 Ejemplo de regresión

Tomar valores promedios entre las coordenadas de dos puntos (datos) sobre la gráfica de dispersión de puntos.

Los promedios son:

(2, 16)

(7.5, 14)

(11, 12)

Según la dispersión de datos del diagrama de puntos, o sea según la tendencia mostrada en la gráfica, la

ecuación más adaptable a los puntos es la ecuación cuadrática:

$$ax^2 + bx + c = y$$

Sustituyendo (tres puntos para obtener 3 ecuaciones)

$$a(2)^2 + b(2) + c = 16$$

$$a(7.5)^2 + b(7.5) + c = 14$$

$$a(11)^2 + b(11) + c = 12$$

Simplificando:

$$4a + 2 \cdot b + c = 16$$

$$55.25a + 7.5 \cdot b + c = 14$$

$$121a + 11 \cdot b + c = 12$$

Resolviendo simultáneamente por inversión de matrices:

$$\begin{pmatrix} 4 & 2 & 1 \\ 55.25 & 7.5 & 1 \\ 121 & 11 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16 \\ 14 \\ 12 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 4 & 2 & 1 \\ 55.25 & 7.5 & 1 \\ 121 & 11 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 16 \\ 14 \\ 12 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.022 \\ -0.159 \\ 16.406 \end{pmatrix}$$

Comprobar resultados:

$4a + 2 \cdot b + c = 16$ Ok, la ecuación es igual a 16

RESULTADO:

$$y = -0.022x^2 - 0.159x + 16.406$$

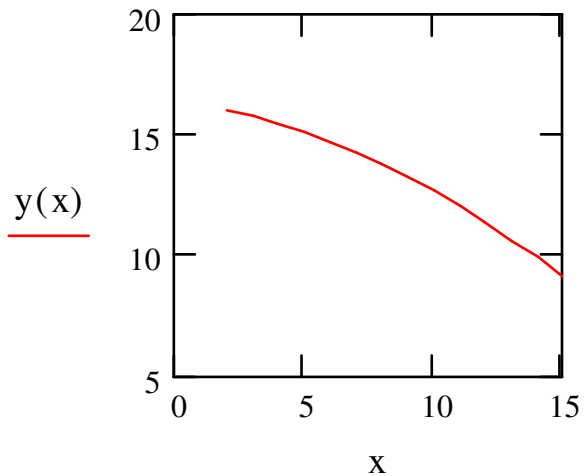
HACER LA GRAFICA:

Serie de valores: $x := 2, 3.. 15$

Ecuación cuadrática:

$$y(x) := -0.022x^2 - 0.159x + 16.406$$

x =	y(x) =
2	16
3	15.731
4	15.418
5	15.061
6	14.66
7	14.215
8	13.726
9	13.193
10	12.616
11	11.995
12	11.33
13	10.621
14	9.868
15	9.071



Para el caso la coordenada (x) puede estar representando el caudal, y la

coordenada (y) representa la carga hidrostática, la potencia o la eficiencia.

DESCRIPCIÓN Y COMPONENTES DEL SISTEMA

El equipo consistió en un tanque de abastecimiento de agua, una electrobomba intercambiable, un tanque volumétrico para medir el caudal (Q) tomando en cuenta el tiempo cronometrado de su llenado, un juego de manómetro (en la descarga) y un vacuómetro (en la succión) ambos para medir la carga dinámica total (Hm); una válvula calibradora para variar los parámetros hidráulicos del sistema (Q) vs (Hm).

La medición del caudal y la carga dinámica total permitieron obtener la potencia hidráulica (Ph) desarrollada por el sistema, sobre la base de que el fluido manejado es agua.

La potencia eléctrica consumida fue medida mediante un medidor convencional de corriente eléctrica.

Los datos provenientes de la operación del sistema permitieron obtener las tres curvas características de un sistema de bombeo y que son: (Q) vs. (Hm), (Q) vs (Ph) y (Q) vs. (E) Eficiencia.

Se describen las características y dimensiones de cada uno de los componentes, equipos, instrumentos y accesorios del sistema de bombeo y se plantea el procedimiento seguido en este trabajo que consistió en tres etapas: inspección, operación del equipo y evaluación de resultados.

3.1 Inspección previa

Se estableció un sistema cíclico que consistió en circular un volumen constante de agua a fin evitar el mal uso y desperdicio del líquido.

Para obtener las curvas de operación, fue necesario determinar los siguientes parámetros:

Altura total manométrica, individualizada en dos componentes principales, aspiración (succión) e impulsión (descarga). Para medir la carga de aspiración se utilizó un vacuómetro o medidor de vacío y para medir la carga de impulsión se utilizó un manómetro de Bourdon. Ambos aparatos fueron colocados lo más cerca de la entrada (vacuómetro) y de la salida (manómetro) de la bomba.

El caudal desarrollado por la bomba para cada altura. El método utilizado fue el volumétrico y se necesitó para ello un tanque para medir la variación de altura de agua dentro del mismo durante un determinado intervalo de tiempo cronometrado.

La potencia consumida por el sistema motorbomba. Se utilizó en este caso un medidor convencional de corriente eléctrica del tipo doméstico.

3. 2. Dimensiones o capacidad de los componentes.

En la construcción del sistema (Figura 3.1) se utilizaron los siguientes componentes:

Tanque de abastecimiento

Las dimensiones del tanque metálico de abastecimiento fueron establecidas considerando el volumen total de agua capaz de llenar todo el sistema de bombeo, incluyendo los dispositivos para la medida del caudal. Se incluyó un volumen permanente como medio de seguridad para impedir que a la bomba entrara aire como consecuencia de un régimen vertical en la entrada de la succión.

Este fenómeno causa la formación de remolinos y la entrada de aire debido a la baja presión que se genera en la succión de la bomba.

El tanque tiene 1,21 m de largo x 0,59 m de ancho x 0,59 m de altura, dimensiones que garantizan un llenado completo del tanque volumétrico sin que se vea afectada la altura o carga de succión. Para garantizar un vaciado rápido, el mismo posee un desagüe constituido por un tapón de 1" (2.54 cm) de diámetro. Están montados sobre una estructura metálica que sirve de base a la bomba y de sostén al tanque volumétrico.

Tanque volumétrico

El tanque metálico volumétrico tiene una capacidad de 60 litros y sus dimensiones son de 80 cm de largo, 40 cm de ancho y 60 cm de alto.

Con estas dimensiones se logró un volumen suficientemente grande que permitió calcular en forma más confiable los respectivos caudales. Posee un piezómetro constituido por una manguera transparente de 5/16"(0.3125 cm) de diámetro y una regla graduada (de cero a 60 cm) para medir la altura de agua dentro del recipiente con la cual se podía, conocida el área de la base del tanque, determinar la variación del volumen.

Para garantizar un vaciado rápido, el mismo posee un desagüe

3.3 Descripción de las bombas de pruebas

El sistema fue probado alternadamente con dos bombas, cuyas especificaciones son las siguientes:

Bomba N° 1.- Marca FANAB, modelo 56 B, con diámetro de succión 1 1/4" (2.79 cm) y descarga 1"(2.54 cm). Posee un impulsor de 3" (7.62 cm) y un motor eléctrico de 110 v, con potencia de ¾ hp (0.75 hp) y rotación de 3.534 rpm.

constituido por un tapón de goma de 2 ½" (5.58 cm) de diámetro. Tiene además dos tubos de 2" (5.08 cm) de diámetro.

Uno de ellos es agujereado y está soldado en la base del tanque, con la finalidad de disminuir la turbulencia producida por la caída del agua, facilitando de esta forma las medidas de altura. El otro tubo atraviesa la base y sirvió para reciclar el agua de un tanque a otro.

Tubería de succión

La tubería de succión es de 1" (2.54 cm) de acero de diámetro y va conectada desde la bomba hasta la fuente de agua o tanque de abastecimiento. Tiene una válvula de bola para regular el caudal de entrada y un vacuómetro para registrar la presión de succión en la entrada del sistema.

Tubería de descarga

La tubería de descarga es de 1" (2.54 cm) de acero de diámetro y va conectada desde la bomba hasta el tanque volumétrico. Tiene una válvula de compuerta para regular el caudal de salida del sistema y un manómetro para registrar la presión en la tubería de salida.

Bomba N° 2.- Marca FANAB, modelo 56 C, con diámetro de succión 1 1/4" (2.79 cm) y descarga 1"(2.54 cm). Posee un impulsor de 2,5" (6.35 cm) y un motor eléctrico de 110 v, con potencia de ½ hp (0.5 hp) y rotación de 3.450 rpm.

EVALUACIÓN Y PRUEBAS DE BOMBEO.

Para realizar estas evaluaciones se puso en funcionamiento el sistema de bombeo en diferentes oportunidades utilizando en cada caso una apertura diferente de la válvula de descarga tratando que la presión variara en un rango más o menos constante. En cada oportunidad se tomaron datos.

$$H_m = H_s + H_d \quad (3)$$

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{L/S}) \quad (4)$$

$$V = b \cdot Z \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_h}{P_c} \cdot 100 \quad (\%) \quad (6)$$

4.1 Fundamentos teóricos

Medida de velocidad y caudal.

La velocidad de flujo (v) se determina midiendo el volumen (V) acumulado del flujo mediante un periodo de tiempo cronometrado (t). Con estas mediciones se determina el caudal:

$$Q = V / t$$

Que a su vez sirve para calcular la velocidad del flujo a través de una area (A) definida.

$$v = Q / A$$

- Altura de carga (H_d) marcada por el manómetro.
- Altura de carga (H_s) marcada por el vacuómetro.
- Variación de altura en el tanque volumétrico en un tiempo determinado.
- Tiempo que tardaba el disco del medidor eléctrico en dar el número de vueltas fijado de antemano.

Con la información obtenida se procedió a calcular para cada condición, la potencia consumida por el sistema en kW, el caudal de la bomba en litros por segundo, la carga total de bombeo en metros, la potencia desarrollada por la bomba en kW y la eficiencia de operación del sistema en porcentaje, utilizando las siguientes fórmulas:

$$P_c = \frac{n}{K \cdot t \text{ (horas)}} \quad (\text{KW}) \quad (1)$$

$$P_h = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{102} \quad (\text{KW}) \quad (2)$$

Donde:

P_c - potencia consumida

P_h - potencia hidráulica

n - número de vueltas del disco del medidor eléctrico

K - constante del medidor eléctrico

t - tiempo

γ - peso específico del agua

Q - caudal en litros por segundo

H_m - carga total de bombeo en metros

H_s - carga de succión

H_d - carga de salida

V - volumen del tanque

b - superficie de la base del tanque volumétrico

Z - variación de altura en el tanque volumétrico

η - eficiencia

4.2 Pruebas de bombeo

Antes de llevar a cabo la evaluación hubo la necesidad de verificar los siguientes aspectos:

SERVICIO REQUERIDOS (chechar disponibilidad)

Corriente de agua

Corriente eléctrica

Cronometro

BANCO HIDRÁULICO

1.- Llenar de agua el tanque de abastecimiento y hasta tocar el fondo del tanque volumétrico (TQ.V).

2.- Verificar que toda la tubería de circulación estén conectadas.

3.- Abrir a un $\frac{1}{4}$ (o a su gusto) la válvula del banco (ubicada en la descarga de la bomba).

4.- Abrir tapón (levantándolo de la cadena) del TQ.V.

5.- Operar la bomba desde el panel de control ON /OFF.

6.- Observar la circulación hasta que el flujo se estabilice.

7.- Taponear el TQ. V. Y vigilar su llenado y su nivel.

8.- Observar al mismo tiempo el indicador de nivel (ubicado en el panel de control) para cronometrar.

9.- Cronometrar cuando el nivel llegue a cero y terminar cuando se alcance a 40 litros. O menos si se desea.

10.- Apagar la bomba

11.- Repetir para otro caudal distinto, desde el paso 3, abriendo la válvula del banco:

- a $\frac{1}{2}$ (o a su gusto)
- a $\frac{3}{4}$ (o a su gusto)
- totalmente

con estos 4 caudales se procedió a llenar el cuadro No. 1 con las presiones en unidades de columnas manométricas.

4.3 Cálculos de potencia y eficiencia

Para ilustrar los cálculos realizados consideremos los datos de la segunda corrida:

1.- Calculo del volumen del tanque volumétrico:

$$L:= 0.8\text{m} \quad \leftarrow \text{largo}$$

$$a:= 0.4\text{m} \quad \leftarrow \text{ancho}$$

$$Z:= 0.6 \quad \leftarrow \text{alto}$$

$$b:=L \cdot (a) \quad b=0.32\text{m}^2 \quad \leftarrow \text{Area transversal del tanque}$$

$$V:=b \cdot Z \quad V=0.192\text{m}^3 \quad \leftarrow \text{Volumen del tanque}$$

2.- Calculo del caudal:

$$t:=112 \text{ s} \quad \leftarrow \text{tiempo cronometrado de su llenado}$$

$$Q:= \frac{V}{t}$$

$$QL=1.714 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

2a.corrida:

$$Q:=1.72$$

Columna de descarga de la bomba
Hd = 5m

Columna de succión
Hs = 1.6m

Peso específico del agua
 $\gamma = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Formulario y cálculos:

Carga total (columna)

$$H_m = H_d + H_s \quad H_m = 6.6\text{m}$$

\leftarrow La bomba está encima del tanque

Potencia hidráulica teórica

$$P_h = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{102} \quad P_h = 0.11 \frac{\text{kg}_m}{\text{s}}$$

s

Potencia consumida

$$P_c = 1.44 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Eficiencia:

$$\eta = \frac{P_h \cdot 100}{P_c} \quad \eta = 7.729$$

Con estos resultados se llenó el cuadro No.1. y con estos datos se trazaron las curvas características de la bomba, colocando el caudal en el eje de las abscisas y la carga total, potencia hidráulica (calculada) y la eficiencia (calculada) en el eje de las ordenadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron los datos obtenidos experimentalmente (caudal y carga) y los valores calculados con formulas y reportados todos en el cuadro No.1. Después de aplicar el método de regresión a los puntos de dispersión se mostraron las siguientes curvas de tendencias de las bombas..

5.1 Resultados

Bomba Nº 1.

Relación Hm vs. Q.

En el Cuadro Nº 1 se observa que el máximo caudal desarrollado por esta bomba fue de 1,96 L/s, valor que se alcanzó cuando la presión de descarga fue igual a cero; en cambio, el máximo valor de carga dinámica total alcanzado fue de 33,4 m, cuando el caudal fue igual a cero.

Una vez localizado los puntos dispersos sobre la gráfica (nubes de puntos) se aplica el método de dispersión

y se obtienen los resultados siguientes: La ecuación de regresión de más ajuste a la relación H vs Q, es la ecuación cuadrática siguiente:

$$H_m = -13,36 Q^2 + 8,83 Q + 33,58,$$

Enseguida se muestra la Tabla de Caudal vs Carga experimentales y valores calculados con la ecuación deducida; así mismo se muestra la gráfica de la Figura 4, comparando ambos tipos de datos.

QvsH :=

	0	1
0	1.96	2
1	1.72	6.6
2	1.57	11.6
3	1.5	16.4
4	1.39	21.4
5	1.25	26.4
6	0.83	31.4
7	0	33.4
8		

DATOS A GRAFICAR

$$H_{mEC} = -13.36Q^2 + 8.83Q + 33.58$$

$$H_{mEC} = \begin{pmatrix} -0.437 \\ 9.243 \\ 14.512 \\ 16.765 \\ 20.041 \\ 23.742 \\ 31.705 \\ 33.58 \end{pmatrix}$$

Figura 4. DATOS DE LA ECUACION A GRAFICAR

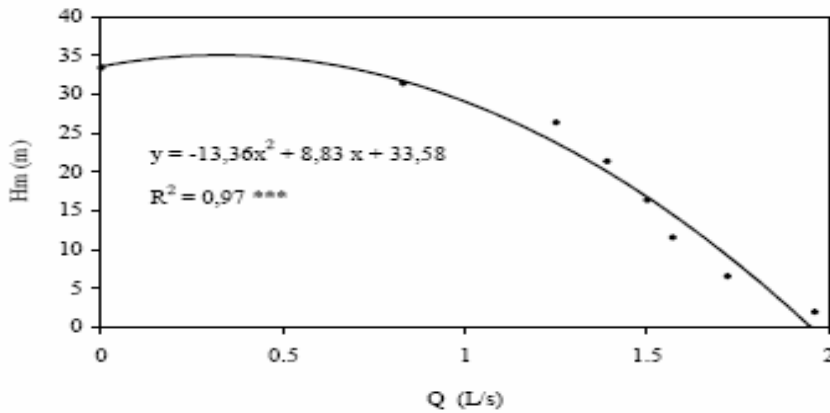
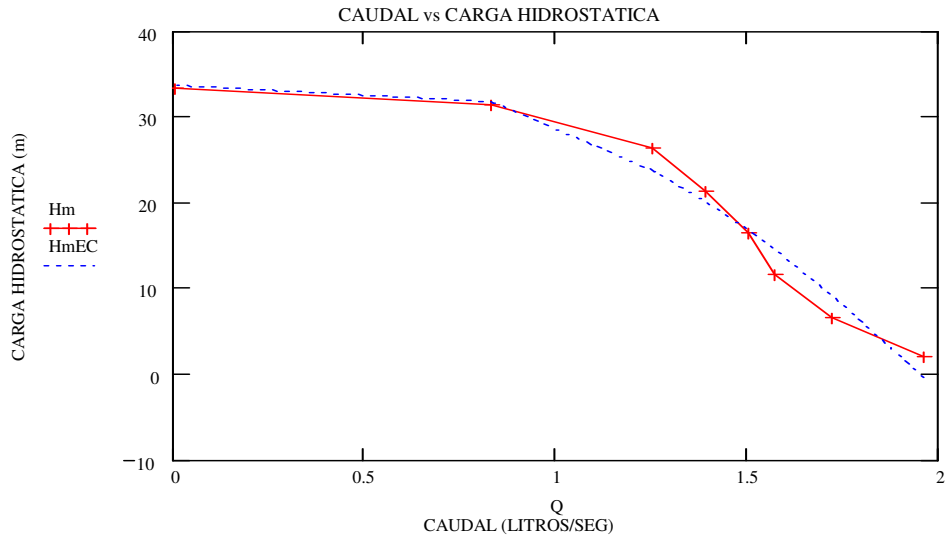


Figura 5. Carga dinámica total (Hm) en relación al caudal (Q) en la Bomba N° 1.

La cual presentó un coeficiente de determinación de 97 %, y un nivel de significación de 0,1 % (Figura 5).

Relación Ph vs Q.

Se observa del cuadro N° 1 que la potencia hidráulica aumentó proporcionalmente hasta llegar a un nivel máximo de 0,32 kW, y a partir de este valor empezó a disminuir. La ecuación de

regresión de más ajuste a la relación Ph vs Q es la ecuación cuadrática:

$$Ph = -0,307 Q^2 + 0,616 Q - 0,005$$

Con un coeficiente de determinación de 94%, y un nivel de significación de 0,1% (Figura 6).

Lectura No.	Presión de Descarga Pd (m)	Presión de Succión Ps (m)	Carga Dinámica total (m) Hm= Hd + Hs	Caudal Q (L/s)	Potencia Hidrául. Ph (Kw)	Potencia Consum. Pc (Kw)	Eficiencia %
1	0	2.0	2.0	1.96	0.038	1.44	2.64
2	5	1.6	6.6	1.72	0.11	1.44	7.73
3	10	1.6	11.6	1.57	0.18	1.48	12.16
4	15	1.4	16.4	1.5	0.24	1.51	15.89
5	20	1.4	21.4	1.39	0.29	1.51	19.20
6	25	1.4	26.4	1.25	0.32	1.49	21.48
7	30	1.4	31.4	0.83	0.26	1.35	10.26
8	32	1.4	33.4	0	0	1.00	0

Cuadro No. 1 Valores de Carga dinámica total, Caudal, Potencia hidráulica, Potencia consumida, Eficiencia, obtenidos con la Bomba No.1

hidráulica desarrollada. La ecuación de regresión de más ajuste a la relación η vs Q, es la ecuación:

Relación η vs Q.

Se observa del cuadro N° 1 que la máxima eficiencia alcanzada por el sistema con la bomba N° 1 fue de 21,48 %, valor que esta muy por debajo del rango esperado. Este valor, sin embargo, coincide con el valor máximo de potencia

$$\eta = 21,19Q^2 + 42,25Q - 0,087$$

Con un coeficiente de determinación de 96%, y un nivel de significancia del 0,1% (Figura 6).

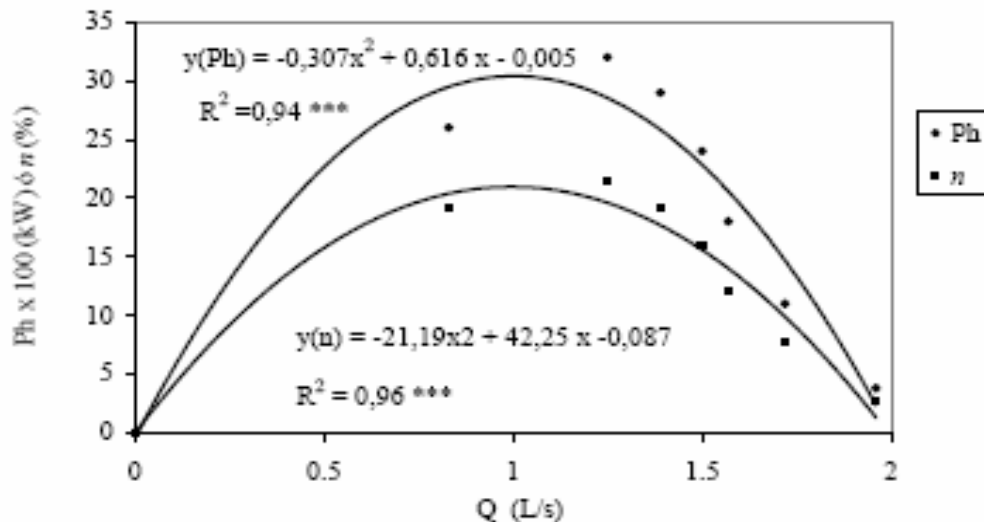


Figura 6. Potencia hidráulica (Ph) vs caudal (Q) y eficiencia (η) vs caudal (Q) en la Bomba N° 1.

Bomba N° 2.

ajuste a la curva Hm vs Q, es la ecuación cuadrática:

Relación Hm vs Q.

En el Cuadro N° 2 se observa que el máximo caudal desarrollado por esta bomba fue de 1,55 L/s, valor que se obtuvo cuando la presión de descarga fue igual a cero, mientras que el máximo valor de carga dinámica total alcanzada fue de 24 m cuando el caudal fue igual a cero. La ecuación de regresión de más

$$H_m = 10,75 Q^2 + 2,46 Q + 23,79,$$

Con un coeficiente de determinación de 99 % y una significancia a un nivel del 0,1 % (Figura 7).

Lectura No.	Presión de Descarga Pd (m)	Presión de Succión Ps(m)	Carga Dinámica total (m) Hm= Hd + Hs	Caudal Q (L/s)	Potencia Hidrául. Ph (Kw)	Potencia Consum. Pc (Kw)	Eficiencia %
1	0	1.8	1.8	1.55	0.037	0.925	2.92
2	5	1.5	6.5	1.37	0.087	0.954	9.12
3	10	1.2	11.2	1.20	0.132	0.955	13.82
4	15	1.0	16.0	1.03	0.162	0.947	17.29
5	20	1.0	21.0	0.56	0.115	0.833	13.84
6	23	1.0	24.0	0	0	0.677	0

Cuadro No. 2 Valores de Carga dinámica total, Caudal, Potencia hidráulica, Potencia consumida, Eficiencia, obtenidos con la Bomba No.2

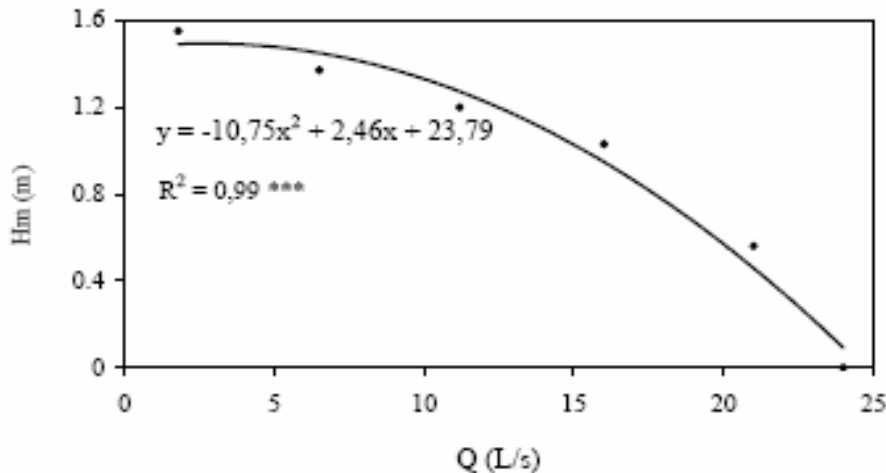


Figura 7. Carga dinámica total (Hm) en relación al caudal (Q) en la Bomba N° 2.**Relación Ph vs Q.**

Se observa que la potencia hidráulica desarrollada aumentó proporcionalmente hasta llegar a un máximo de 0,162 Kw, y a partir de allí empieza a disminuir hasta llegar a cero (Cuadro 2). La ecuación de regresión de más ajuste a la curva Ph vs Q, es la ecuación cuadrática:

$$Ph = 0,231 Q^2 + 0,386 Q - 0,0067$$

Con un coeficiente de determinación de 95 % y significancia a un nivel del 5% (Figura 8).

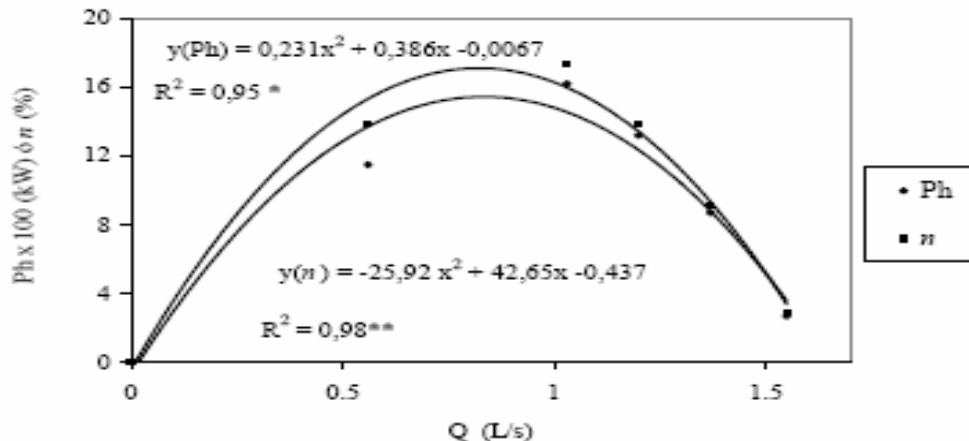
Relación η vs Q.

Se observa que la máxima eficiencia alcanzada por el sistema cuando se uso esta bomba también fue muy bajo (17,29 %), valor este que coincide con el de máxima potencia hidráulica desarrollada (Cuadro 2).

La expresión matemática que más se ajusta a la curva η vs Q, es la ecuación:

$$\eta = -25,92 Q^2 + 42,65 Q - 0,437$$

Que presenta un coeficiente de determinación de 98 % y significancia a un nivel del 1 % (Figura 8).

**Figura 8.** Potencia hidráulica (Ph) y eficiencia (η) en relación al caudal en la Bomba N° 2.**5.2 Discusión**

De todos los resultados obtenidos se observa que los datos que están por debajo del nivel esperado son los de eficiencia de bombeo. La eficiencia de bombeo es igual al producto de la eficiencia de la bomba por la eficiencia del motor eléctrico, y usualmente está

dentro de un rango de 40 – 70 %, dependiendo de los tipos de motor y bomba. Durante las pruebas, la máxima eficiencia obtenida fue de sólo 21,48 %, lo que podría atribuirse a una imprecisión del medidor eléctrico utilizado o a fallas en el proceso de medición.

CONCLUSION

Las curvas características del sistema de bombeo probado, las cuales incluyen el caudal, presión, potencia hidráulica y eficiencia, tuvieron la misma forma y tendencia que las curvas características normales, para bombas de este tipo.

La función matemática que dominó las modelos de las curvas H_m vs. Q y Ph vs. Q , fue la función cuadrática (polinomial de segundo grado) presentándose coeficientes de determinación comprendidos entre 94 y 99 %, los cuales siempre fueron significativos estadísticamente.

Se observó una notoria diferencia entre los valores de energía eléctrica medida con relación a los valores de energía hidráulica desarrollada. Esta incongruencia se tradujo en valores de eficiencia muy bajos.

Así mismo, se lograron los objetivos principales que se propusieron y que son:

1.- Poner en marcha de un banco de pruebas de bombeo.

2.- Efectuar pruebas experimentales para conocer su comportamiento hidrodinámico.

3.- Diseñar una tabla para reportar los datos experimentales obtenidos en las diferentes corridas.

4.- En base a estos datos obtener otros parámetros de comportamiento usando fórmulas de ingeniería, resultados que también se reportan en la tabla de datos.

5.- Analizar los datos aplicando el método estadístico de regresión para educir las ecuaciones de las curvas de comportamiento.

6.- Graficar las curvas a partir de las ecuaciones deducidas de los datos.

7.- Discutir los resultados finales.

BIBLIOGRAFIA

1. Viejo, M. 1989. Bombas. Teorías. Diseño y Aplicaciones. 2° edición (6° reimpresión). Limusa. México.

2. Manual de Mantenimiento Industrial. (Tomo V) Autores Robert C. Rosaler, P.E. Editorial Mc graw-hill.

Confidencial Página 1 01/07/2007

3. Bombas Centrífugas. Selección, operación y mantenimiento. Autor Igor J. Karassik y Roy Carter

4. Seguridad e Higiene en el Trabajo Autor Roderhar Lija

5. Internet www.Archivos.com/trabajo/tecnologia/720.htm

6.-Internet www.mathcad.com