

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
DIVISION DE INGENIERÍA**



**DETERMINACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS
EN BOMBAS CENTRÍFUGAS DE ENERGÍA SOLAR**

POR:

MARIO ELISEO ROQUE CRUZ

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. JUNIO DEL 2004

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**Determinación de curvas características
en bombas centrífugas de energía solar**

POR:

MARIO ELISEO ROQUE CRUZ

TESIS

**Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador
como requisito parcial para obtener el título de:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN.

APROBADA

Presidente del jurado

DR. Felipe de Jesús Ortega Rivera.

Asesor principal

M.C. Sergio Z. Garza Vara

Asesor

M.C. Daniel Loyola Licea

Asesor

M.C. Gregorio Briones Sánchez

Asesor

M.C. Luis Edmundo Ramírez Ramos

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio del 2004.

AGRADECIMIENTOS

A ti **Dios**, creador de este maravilloso universo, por que me has permitido recibir el don de la vida junto con las facultades suficientes para poder alcanzar esta gran meta, que hoy marca el final de una etapa de mi vida y el principio de mi trayectoria profesional. Gracias por darme un hogar en donde vivir, unos padres y hermanos ejemplares...mil gracias por ponerme en mi camino a todas las personas que tu has querido, que con sus virtudes y ejemplos he aprendido mucho de ellas.

A mi **Alma Mater (Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”)**, por brindarme la oportunidad de hacer uso de su infraestructura para poder desarrollarme académicamente con la colaboración de su personal docente y administrativo, así como también por todos los servicios que me brindó durante este tiempo y que de alguna u otra manera hicieron más placentera mi vida estudiantil en esta gloriosa institución.

Al **Dr. Felipe de Jesús Ortega Rivera**, por todo su valioso e incondicional apoyo que me otorgó durante mi formación profesional y por darme su confianza en la realización de este trabajo,

Al **M.C. Sergio Garza Vara**, por sus grandes enseñanzas durante mi formación académica y por su participación en el presente trabajo.

AL **M.C. Daniel Loyola Licea**, por el por todo en apoyo y la confianza que depositó en mí en todo el desarrollo de este proyecto.

Al M.C. **Gregorio Briones Sánchez**, por la atención que me brindó durante mi formación profesional.

A los **catedráticos del Departamento de Riego y Drenaje**, por que fueron para mí un estímulo más para alcanzar este sueño.

❖ **M.C. Manuel González Molina.**

❖ **Dr. Salvador Muñoz Castro.**

❖ **M.C. Jorge del Ángel Vargas.**

❖ **Dr. Julio A. Méndez Berlanga.**

❖ **Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho.**

Y a todas aquellas personas que contribuyeron de alguna manera en este trabajo con su valiosa colaboración.

DEDICATORIA

A MIS MARAVILLOSOS PADRES:

Con todo mi amor y respeto les dedico este título por todos los esfuerzos y sacrificios que han realizado para sacarnos adelante a mí y a cada uno de mis hermanos.

Sr. Eduardo Roque Zongua (†)

Sra. Tomasa Cruz Pérez

A la memoria de mi padre, por que su recuerdo siempre está presente en mí y ha sido mi motivo de superación, sin duda alguna me dejó la mejor de las herencias,...su ejemplo.

A ti mamá, por tu amor infinito que me has regalado en cada instante de mi vida... mil gracias.

A MIS HERMANOS:

A **Epifanio, Pablo, Hilario, Martín, Magdalena, Juliana**, por que me han apoyado incondicionalmente en todas mis decisiones, siempre estaré infinitamente agradecido con cada uno de ustedes.

A MIS QUERIDOS SOBRINOS:

Quienes con su cariño e inocencia han venido a alegrarnos más la vida.

A MIS GRANDES AMIGOS:

A **Lázaro Roque Mendoza, José Luis Ramírez, Juan Patistán, Francisco Vargas, Víctor Romeo (Monclova), Luis Sánchez (Pitágoras), Mario A. Cerda**

(Sheriff), Abelmar López, Avelino Peña Monroy, Cornelio Luna Razo y Jacobo A. López, por todo... nunca los olvidaré.

Al **profesor Francisco Aguilón**, por sus sabios consejos en cada entrenamiento y por la confianza que depositó en mí en cada partido de fútbol.

Al **Fútbol Soccer**, a ese deporte maravilloso que me ha regalado momentos inolvidables de gran felicidad y que ha sido una de mis fuentes de alegría e inspiración para seguir siempre adelante, principalmente en los momentos más difíciles.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE CUADROS.....	xii
RESUMEN.....	1
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Justificación.....	2
Objetivos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
BOMBA CENTRÍFUGA.....	3
Definición.....	3
Generalidades.....	3
Principio de funcionamiento.....	4
Curvas características de bombas centrífugas.....	7
Curvas características reales.....	8
Leyes de afinidad.....	10
Carga neta de succión positiva.....	12
Cavitación.....	13
Velocidad específica.....	14
CORRIENTE ELÉCTRICA.....	16
Corriente Alterna (CA) y Corriente Directa (CD).....	16
Potencia eléctrica.....	17
MOTOR ELÉCTRICO.....	18
Introducción.....	18
Descripción de los componentes del motor de CD.....	18

Magnetismo.....	21
Propulsión magnética del motor.....	25
Operación básica del motor de CA.....	26
ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	28
El recurso solar.....	28
La trayectoria solar.....	30
El efecto fotovoltaico.....	31
Clasificación de las celdas solares.....	34
Módulos fotovoltaicos.....	35
Arreglos fotovoltaicos.....	38
Inclinación del arreglo fotovoltaico.....	40
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
SITIO EXPERIMENTAL.....	42
Ubicación geográfica	42
Clima	42
Descripción del área de trabajo.....	43
MATERIAL UTILIZADO.....	43
Equipo eléctrico.....	43
Equipo Hidráulico.....	44
Instrumentos de medición y herramientas.....	44
Descripción de las bombas centrífugas empleada.....	45
Equipamiento y disposición de las bombas centrífugas.....	46
METODOLOGÍA	47
Procesamiento de datos y ecuaciones utilizadas.....	49
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
V. CONCLUSIONES.....	74
VI. RECOMENDACIONES.....	77
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Pags
Figura 2.1 Diagrama de velocidades a la entrada y a la salida del álabe en un impulsor de bomba centrífuga.....	6
Figura 2.2 Transformación de la curva ideal en real por las pérdidas.....	9
Figura 2.3 Visualización de la CD.....	16
Figura 2.4 Visualización de la CA.....	17
Figura 2.5 Piezas que componen el rotor.....	18
Figura 2.6 Partes que integran el estator.....	20
Figura 2.7 Dirección de las líneas del flujo de un campo magnético.....	22
Figura 2.8 Campo magnético representado por las líneas concéntricas alrededor del conductor.....	23
Figura 2.9 Las líneas magnéticas que circulan alrededor de un conductor salen del polo N y entran al polo S.....	23
Figura 2.10 Cambio de los polos de una bobina electromagnética cuando la dirección del flujo de la corriente cambia.....	24
Figura 2.11 Propulsión magnética del motor.....	25
Figura 2.12 Componentes eléctricos básicos de un motor de CA.....	27
Figura 2.13 Rotación del campo magnético de un motor de CA.....	28
Figura 2.14 Irradiancia y horas solares pico (insolación) durante un día soleado.....	30
Figura 2.15 Movimiento aparente del sol en la bóveda celeste en función de la hora del día y la época del año.....	31
Figura 2.16 Juntura N-P en Equilibrio.....	33
Figura 2.17 Generación de electricidad en una celda fotovoltaica.....	34
Figura 2.18 Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de radiación (temperatura 36	

	constante 25 °C).....	
Figura 2.19	Curva IV y PV para un módulo fotovoltaico típico a 1,000 W/m ² y 25 °C.....	37
Figura 2.20	Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes temperaturas de operación (irradiancia constante 1 000 W/m ²).....	38
Figura 2.21	Analogía de una conexión en serie entre un sistema eléctrico y un hidráulico.....	39
Figura 2.22	Analogía de una conexión en paralelo entre un sistema eléctrico y un hidráulico.....	40
Figura 2.23	Orientación de una estructura fija para maximizar la captación de radiación solar a lo largo del año.....	41
Figura 3.1	Figura 3.1. Bomba centrífuga número 1.....	45
Figura 3.2	Figura 3.2. Bomba centrífuga número 2.....	46
Figura 3.3	Instalación del experimental dela bomba centrífuga evaluada.....	47
Figura 3.4	Diagrama de la instalación eléctrica del experimento.....	48
Figura 4.1.1	Curva característica de Carga de descarga (Hd) vs Gasto (Q); cuando hs = 0.40 m.....	55
Figura 4.1.2	Curva característica de Potencia hidráulica (Ph) vs Gasto (Q); cuando hs = 0.40 m.....	55
Figura 4.1.3	Curva característica de Eficiencia (n) vs Gasto (Q); cuando hs = 0.40 m.....	56
Figura 4.1.4	Curva característica de las Revoluciones por minuto (RPM) vs Gasto (Q); cuando hs = 0.40 m.....	56
Figura 4.1.5	Curvas características de la bomba número 1; cuando hs = 0.40 m.....	57
Figura 4.1.6	Curva característica de Potencia eléctrica (Pe) vs Gasto (Q); cuando hs = 0.40 m.....	57
Figura 4.2.1	Curva característica de Carga de descarga (Hd) vs Gasto	63

(Q); cuando $h_s = 0.40$ m.....	
Figura 4.2.2 Curva característica de Potencia hidráulica (P_h) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.....	63
Figura 4.2.3 Curva característica de Eficiencia (η) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.....	64
Figura 4.3.4 Curva característica de las Revoluciones por minuto (RPM) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.....	64
Figura 4.2.5 Curvas características de la bomba número 1; cuando $h_s =$ 0.40 m.....	65
Figura 4.2.6 Curva característica de Potencia eléctrica (P_e) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.....	65
Figura 4.3.1 Curva característica de Carga de descarga (H_d) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.....	69
Figura 4.3.2 Curva característica de Potencia hidráulica (P_h) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.....	69
Figura 4.3.3 Curva característica de Eficiencia (η) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.....	70
Figura 4.3.4 Curva característica de las Revoluciones por minuto (RPM) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.....	70
Figura 4.3.5 Curvas características de la bomba número 1; cuando $h_s =$ 0.40 m.....	71

INDICE DE CUADROS

Cuadros	Pags
Cuadro 4.1 Datos experimentales de la bomba centrífuga número 1.....	51
Cuadro 4.2 Datos experimentales de la bomba centrífuga número 2 operando con velocidad baja.....	52
Cuadro 4.3 Datos experimentales de la bomba centrífuga número 2 operando con velocidad alta.....	53
Cuadro 4.4 Resultados de la bomba número 1.....	54
Cuadro 4.5 Valores de las variables en punto de máxima eficiencia de la bomba número 1.....	60
Cuadro 4.6 Resultados de la bomba centrífuga con la velocidad baja del motor.....	62
Cuadro 4.7 Valores de las variables en punto de máxima eficiencia de la bomba número 2 con velocidad baja del motor.....	67
Cuadro 4.8 Resultados de la bomba número 2 con la velocidad alta del motor.....	68
Cuadro 4.9 Valores de las variables en punto de máxima eficiencia de la bomba número 2 con velocidad alta del motor.....	73

I. INTRODUCCIÓN

La dificultad para suministrar agua en cantidad y calidad suficientes a los sectores rural y urbano-marginal, es uno de los grandes problemas que se enfrentan los países en vías de desarrollo como el nuestro. El abastecimiento de agua esta supeditado a la disponibilidad de fuentes de energía acordes con las condiciones sociales, culturales y económicas de cada población.

Actualmente existen lugares donde el abastecimiento de agua es difícil, por encontrarse a lugares distantes y esto les imposibilita contar con fuentes de energía compatibles con los equipos de bombeo convencionales. Los equipos de bombeo mas difundidos son las motobombas y las electrobombas. Las primeras aprovechan la energía de los combustibles derivados del petróleo y el accionamiento de las últimas se hace mediante la utilización de la energía eléctrica.

Mas sin embargo, el elevado precio por unidad de energía eléctrica o unidad de volumen de los hidrocarburos aunado al alto costo de los equipos de bombeo, han contribuido a que muchas poblaciones principalmente en zonas rurales, se restrinjan de muchas actividades productivas que sin lugar a dudas les permitiría tener acceso a un mejor nivel de vida.

Ante este panorama surge la necesidad de generar tecnología que este al alcance de los sectores más desprotegidos de la población.

JUSTIFICACIÓN

En muchas comunidades rurales de la República Mexicana, los habitantes no disponen de red eléctrica a distancias que hagan costear su extensión a los lugares de cultivo para riego, abrevadero o consumo humano de agua.

La energía solar se revela a menudo como la solución más económica para el bombeo de agua en las zonas remotas y no electrificadas. Además se presenta como un recurso energético inagotable e inofensivo para el medio ambiente.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Proporcionar a las comunidades rurales y general, una alternativa de bombas centrífugas con alimentación fotovoltaica más económicas que los sistemas de importación, a través de ensamblar componentes de fabricación nacional para construir las bombas centrífugas.

Objetivo específico:

Determinar las curvas características de mínimo dos bombas centrífugas con energía fotovoltaica.

II. REVISION DE LITERATURA

LA BOMBA CENTRÍFUGA

Definición

Karassik y Carter (1971), definen que es una máquina que consiste de un conjunto de paletas rotatorias encerradas dentro de caja, cárter, cubierta o coraza. Las paletas imparten energía al fluido por la fuerza centrífuga.

Polo Encinas (1980), dice que esta turbomáquina, sirve para producir una ganancia en carga estática en un fluido. Imprime pues, una energía a un fluido procedente de una energía mecánica que se ha puesto en su eje por medio de un motor.

Generalidades

Una bomba centrífuga es una turbomáquina de tipo radial con flujo de dentro hacia fuera, presentando por lo general un área de paso de agua relativamente reducida en relación con el diámetro del impulsor, con objeto de obligar al fluido a hacer un recorrido radial largo y aumentar la acción centrífuga, a fin de incrementar la carga estática, que es lo que generalmente se pretende con este tipo de bomba aunque el gasto en parte se sacrifique.

Las partes esenciales de la bomba centrífuga son el impulsor provisto de álabes y la caja o carcasa en que está alojado el mismo, la cual forma un todo con la voluta o difusor, la forma cónica del dicto de salida del rotor que

permite reducir la velocidad y transformar, en parte la energía cinética en energía potencial.

Las bombas centrífugas pueden ser de succión simple o de doble succión. En las primeras, el agua entra en el ojo del impulsor por un solo lado de éste. Pero cuando se requiere admitir más caudal sin aumentar el diámetro del ojo de entrada, lo que reduciría el recorrido radial y la carga, se dispone la doble succión, o entrada por dos lados del impulsor.

Los impulsores pueden ser cerrados o abiertos. En el primer caso, los álabes generalmente de tipo bidimensional, tienen dos cubiertas laterales, con salida periférica del agua, constituyendo el conjunto todo el impulsor; en el segundo caso, los álabes puede ser de tipo bidimensional o tridimensional (alabeados), y sólo presentan una cubierta lateral en la que van engastados los álabes, total o parcialmente. El ducto entre álabes se cierra con la pared de la carcasa. El material de los impulsores es generalmente de bronce fundido (85% Cu, 5% Zn, 5% Pb, y 5 % Sn), y en ciertos casos de plástico. La carcasa suele ser de hierro vaciado, (Polo Encinas, 1980).

Principio de funcionamiento.

Polo Encinas (1980), dice que la tubería de alimentación de una bomba centrífuga alcanza a la carcasa en dirección axial y el agua penetra en esa dirección en el ojo del impulsor. En el caso de los impulsores cerrados con álabes bidimensionales, el agua incide en el álabe cuando el flujo ha tomado la dirección radial; pero si se trata de álabes tridimensionales y particularmente en impulsores abiertos, el agua ataca el álabe en dirección axial. En cualquier caso, el agua realiza su recorrido de dentro hacia fuera en dirección radial y sale por la periferia del impulsor. Se procura, frecuentemente, que no haya giro del fluido en el momento de la incidencia en los álabes, esto es, que la

componente tangencial del fluido $V_{U1} = 0$, con lo que se mejora la transferencia de energía, que en la expresión de Euler se reduce a:

$$H = \frac{U_2 V_2}{g_c} \quad (\text{Ec.1})$$

Esto es, queda condicionada solamente a los valores de las velocidades tangenciales del fluido y del álabe a la salida del impulsor. Para aumentar la transferencia H , se debe aumentar U_2 o V_{U2} o las dos. Como $U_2 = \omega R_2$, para elevar el valor U_2 se debe aumentar la velocidad de giro de la máquina o el radio del impulsor, lo que equivale a incrementar la acción centrífuga, la cual es la que tiene mayor influencia en la transferencia energética de estas bombas.

La ω está limitada por los efectos de cavitación, correspondiendo los valores de ω a valores de N inferiores a 4 000 revoluciones por minuto (rpm), en términos generales.

Lo más corriente es que la velocidad de giro oscile entre 1 000 y 2 000 rpm, pero puede ser más alta para máquinas chicas y más baja para máquinas muy grandes. Esto obliga a que la potencia se tenga que ganar a expensas del par en las máquinas grandes, esto es, aumentando el radio del impulsor y por tanto el tamaño de la máquina.

Por otra parte el valor de V_{U2} debe ser más pequeño para tener un buen rendimiento de la bomba. Debido a que el vector V_{U2} es de magnitud reducida en virtud de que la velocidad absoluta de salida V_2 debe ser pequeña en una bomba, pues lo que se busca es carga estática y no dinámica. Además, el sentido del vector V_{U2} debe ser el mismo que el de U_2 (Fig. 2.1), para no cambiar el signo del producto $U_2 * V_{U2}$, lo cual convertiría a una máquina receptora en motora.

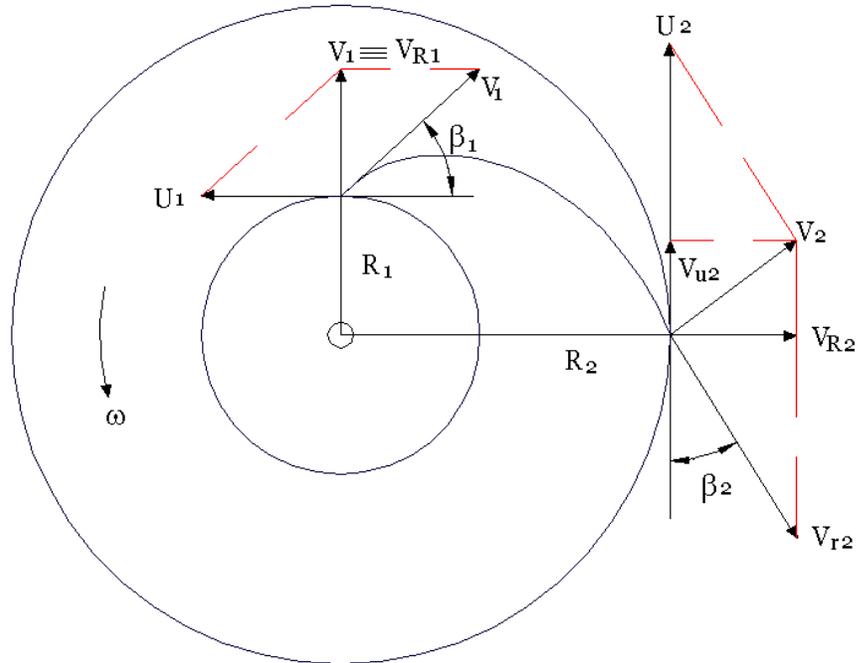


Figura 2.1. Diagrama de velocidades a la entrada y a la salida del álabe en un impulsor de bomba centrífuga.

Estas condiciones, exigidas por el rendimiento, van obligando a un valor más alto de la velocidad de salida V_{r2} , que en muchos casos llega a ser mayor que la relativa de entrada V_{r1} . Cuando esto sucede, el agua sufre una aceleración en su movimiento por entre los álabes, lo que reduce la transferencia, pues la componente energética

$$\frac{V_{r1} - V_{r2}}{2 g_c} \quad (\text{Ec.2})$$

se hace negativa, disminuyendo la carga estática que tendrá que obtenerse solamente a expensas de la acción centrífuga.

$$\frac{U_2^2 - U_1^2}{2 g_c} \quad (\text{Ec.3})$$

Normalmente se hace girar a los impulsores de las bombas centrífugas con los álabes curvados hacia atrás, con lo que reduce mucho el valor de la

velocidad absoluta de salida V_2 y por ende la energía dinámica, mejorando el rendimiento. Pero baja la transferencia, pues V_{U2} resulta pequeña y en consecuencia se reduce el producto $U_2 * V_{U2}$ que cuantifica la energía. Es por esto que la bomba centrífuga de buen rendimiento es de baja transferencia energética.

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

Karassik y Carter (1971), indican que a diferencia de las bombas de desplazamiento positivo, una bomba centrífuga que opera a velocidad constante puede descargar cualquier gasto 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.

Las interrelaciones de gasto, carga, potencia y eficiencia se denominan características de la bomba. Estas interrelaciones se muestran mejor gráficamente y la gráfica obtenida se llama gráfica de las curvas características de la bomba.

La carga, potencia y la eficiencia generalmente se trazan contra la capacidad a velocidad constante.

Cuando se usan impulsores de velocidad variable, se incluye un quinto componente, la velocidad de operación de la bomba expresada en revoluciones por minuto (rpm). Cuando las condiciones de succión pueden ser críticas, la curva límite de elevación de succión-capacidad, o la curva de requerimiento de npsH-capacidad es la que se muestra con frecuencia.

Hicks (1976), enuncia que una bomba centrífuga que opera a velocidad constante puede suministrar cualquier gasto desde cero hasta un máximo dependiendo de la columna, diseño y succión. Las curvas características muestran la relación existente entre la columna o carga de la bomba, capacidad, potencia y eficiencia para un diámetro específico del impulsor y para un tamaño determinado de la carcasa. Es habitual dibujar la columna, potencia y eficiencia en función de la capacidad a velocidad constante.

Curvas características reales.

Polo Encinas (1980) señala que la característica ideal de una bomba centrífuga se deforma a causa de las pérdidas de energía que se producen en el funcionamiento de la máquina, dando lugar a una característica real, cuya forma define la experimentación. La justificación cualitativa es la siguiente. La carga dinámica total (TDH = total dynamic head) se compone de los términos siguientes

$$TDH = \frac{V_t^2}{2g} + h + H_{pérdidas} \quad (\text{Ec.4})$$

esto es, la carga de velocidad en la tubería de descarga, la carga piezométrica y la pérdidas.

Estas pérdidas son las que transforman la característica lineal en la curva real carga-caudal, como puede verse en la figura No. 2.3 son las siguientes:

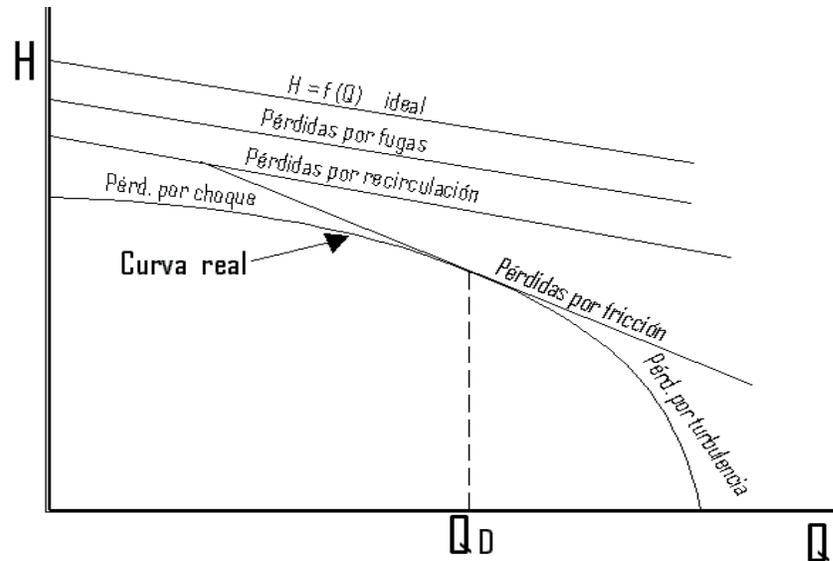


Figura 2.2 Transformación de la curva ideal en real por las pérdidas.

Pérdidas por fugas a través de los sellos o estoperos, aunque siempre se propicia un lacrimo para un efecto de lubricante y reducción de la acción abrasiva que produce la fricción del eje sobre los sellos

Pérdidas por recirculación del agua entre el impulsor y la carcasa, las cuales son mayores en los impulsores abiertos, debido a la necesaria luz de entrehierro, aun dentro de los mayores ajustes.

Pérdidas por fricción del agua sobre los contornos que definen los ductos de circulación del agua: álabes, cubiertas y carcasa. Varían con el cuadrado de la velocidad relativa y a pequeños gastos son prácticamente nulas por ser reducida la velocidad. Influye la rugosidad de la paredes.

Pérdidas por turbulencias debidas a la separación del fluido de los contornos de los álabes y por choque contra éstos en la incidencia, sobre todo al trabajar la bomba fuera de las condiciones de diseño. Los choque se presentan al reducir el gasto y las turbulencias a aumentarlo más allá de las condiciones de diseño. En efecto, la V_1 varía en magnitud en el mismo sentido que el gasto, y si se conserva constante la velocidad de giro, U_1 permanece la

misma, con lo que V_{r1} modifica su posición, saliéndose de la posición tangente al álabe, ya chocando contra él o separándose del mismo.

LEYES DE AFINIDAD

Karassik y Carter (1971), dicen que existen ciertas relaciones que permiten que el funcionamiento de una bomba centrífuga se pueda predecir para una velocidad que no sea aquella para la cual se conoce la característica de la bomba.

Existen también ciertas características que permiten predecir el comportamiento de la bomba si se reduce el diámetro del impulsor (dentro de un límite que depende del diseño del impulsor) de las características obtenidas con el diámetro más grande.

Cuando la velocidad (rpm), cambia: (1) La capacidad o gasto para un punto dado en las características de la bomba varía como la velocidad y al mismo tiempo, (2) la carga varía como el cuadrado de la velocidad y (3) la potencia (bhp) varía como el cubo de la velocidad.

Estas relaciones toman la forma de ecuaciones como sigue:

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 \left(n / n_1 \right) \\ H &= H_1 \left(n / n_1 \right)^2 \\ P &= P_1 \left(n / n_1 \right)^3 \end{aligned} \tag{Ec. 5}$$

$$\frac{n}{n_1} = \frac{Q}{Q_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{P}{P_1}}$$

En las cuales:

n = nueva velocidad deseada, en rpm.

Q = capacidad, en litros por minuto a la velocidad deseada n .

H = carga, en metros a la velocidad deseada n para la capacidad Q .

P = caballos de fuerza al freno a la velocidad deseada n con H y Q .

n_1 = una velocidad, en rpm cuyas características se conocen.

Q_1 = una capacidad, a la velocidad n_1 .

H_1 = carga, a la capacidad Q_1 a la velocidad n_1 .

P_1 = caballos de fuerza al freno a la velocidad n_1 con H_1 y Q_1 .

Estas relaciones para un cambio de velocidad se pueden usar con seguridad para cambios moderados de velocidad. Pueden no ser precisas para cambios grandes de velocidad, especialmente en incrementos de velocidad.

Cuando el diámetro del impulsor cambia: (1) la Capacidad para un punto dado en la característica de la bomba varía como el diámetro del impulsor, y al mismo tiempo, (2) la carga varía como el cuadrado del diámetro del impulsor, y (3) la potencia (bhp) varía como el cubo del diámetro del impulsor. Expresadas como ecuaciones, éstas son:

$$Q = Q_1 \left(D / D_1 \right)$$

$$H = H_1 \left(D / D_1 \right)^2$$

$$P = P_1 \left(D / D_1 \right)^3$$

ó

$$\frac{D}{D_1} = \frac{Q}{Q_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{P}{P_1}}$$

(Ec.6)

En las cuales:

D_1 = Diámetro original en cm.

D = diámetro rebajado en cm.

Q_1 = capacidad con el impulsor de D_1 .

Q = capacidad correspondiente con impulsor D .

H_1 = carga con impulsor de D_1 a Q_1 .

H = carga correspondiente con impulsor D a Q .

P_1 = bhp con impulsor de D_1 a Q_1 y H_1 .

P = bhp con impulsor de D a Q y H .

El diámetro de un impulsor común se puede rebajar en un torno un 20 % de su valor máximo original sin efectos adversos. Rebajándolo a menos de 80 %, por lo general resultará una eficiencia mucho más baja.

Carga de Succión Positiva Neta (Net Positive Suction Head, NPSH)

S.R.H (1974), lo define como la presión disponible o requerida para establecer un flujo a través del elemento de succión al ojo del impulsor o carcasa de la bomba, cuyo valor nunca deberá reducirse al correspondiente a la presión de vapor del líquido manejado. Se expresa en metros de columna del líquido bombeado.

Villareal (2001), argumenta que es un análisis de las condiciones energéticas en el lado de succión de una bomba para determinar si el líquido se evaporará en el punto de presión más bajo de la bomba.

La presión ejercida por un líquido sobre su alrededor depende de su temperatura. Esta presión, denominada presión de vapor, es una característica única de cada fluido y aumenta con el incremento de temperatura.

Cuando la presión de vapor dentro de un fluido alcanza la presión del medio circundante, el fluido comienza a evaporarse o a hervir. La temperatura a la cual ocurre esta evaporación disminuirá a medida que la presión del medio circundante disminuye.

El volumen de un líquido aumenta significativamente cuando se evapora. Un pie cúbico de agua a temperatura ambiente se convierte en 1700 pies cúbicos de vapor a la misma temperatura.

La carga de succión positiva neta (NPSH) es sencillamente una medida de la cantidad de carga de succión presente para impedir esta evaporación al punto de presión más bajo de la bomba.

Cuando el líquido pasa de la succión de la bomba al ojo del impulsor, la velocidad aumenta y la presión disminuye. Además, hay pérdidas de presión debido a choque y turbulencia cuando el líquido choca contra el impulsor.

La NPSH Requerida es la carga positiva en pies absolutos requerida en la succión de la bomba para vencer estas caídas de presión en la bomba y mantener el líquido a una presión superior a su presión de vapor. La NPSH Requerida varía con la velocidad y la capacidad dentro de cualquier bomba en particular. Normalmente las curvas del fabricante de la bomba proporcionan esta información.

La NPSH Disponible es una función del sistema en el cual funciona la bomba. Es el exceso de presión del líquido en pies absolutos por encima de su presión de vapor a medida que llega a la succión de la bomba.

CAVITACIÓN

S.R.H (1974), menciona que es un fenómeno de formación y desaparición rápidas de cavidades llenas de vapor del líquido que fluye porque pasa de una zona de baja a otra de alta presión.

cuando en el seno de un líquido en movimiento la presión se reduce a la correspondiente del vapor de ese líquido a la temperatura ambiente dominante,

se presenta una formación de bolsas de vapor que desaparecen súbitamente al entrar en otra zona donde la presión tiene un valor tal que se condensan, es decir, se torna a líquido.

Cuando un líquido en movimiento roza una superficie se produce una caída de presión local, y puede ocurrir que se alcance la presión de vaporización del líquido, a la temperatura que se encuentra dicho líquido. En ese instante se forman burbujas de vapor. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implotan.

La implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido y las mismas pueden disiparse en la corriente del líquido o pueden chocar con una superficie. Si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse metalúrgicamente y se inicia una erosión que además de dañar la superficie provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor.

VELOCIDAD ESPECIFICA

Karassik y Carter (1971), señalan que es un número índice, sin dimensiones que es numéricamente igual a la velocidad giratoria a la que un modelo exacto teórico de una bomba centrífuga tendría que opera con el objeto de descargar una unidad de capacidad contra una unidad de carga.

Hicks, (1976), establece que es un índice del tipo de bomba, que usa la capacidad máxima de columna que se obtiene en el punto de máxima eficiencia y que éste índice determina el perfil o forma general del impulsor y su expresión matemática es la siguiente:

Sistema Ingles

Sistema métrico

$$N_s = \frac{N \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \text{ ó } N_s = \frac{N \sqrt{Q * 15.85}}{(H * 3.28)^{3/4}} \quad (\text{Ec.7})$$

En donde:

N_s = es la velocidad específica de la bomba, adimensional.

N = es la velocidad del impulsor, en rpm.

Q = es el caudal, en galones por minuto (gpm ó lps).

H = es la carga hidráulica, en pies (ft ó mca)

En números, la velocidad específica es la velocidad en revoluciones por minuto a la cual un impulsor deberá girar si su tamaño se reduce para dar un gasto de un litro por segundo contra una columna de un metro. Los impulsores para columnas altas tienen generalmente una velocidad específica baja mientras que los que se utilizan para columnas reducidas tienen una alta velocidad específica.

Uno de los mayores problemas de ingeniería en bombas centrífugas, es la selección del mejor tipo de bomba o la velocidad específica para cierta condición de servicio. Este problema nos presenta los siguientes puntos a considerar.

1. Las altas velocidades específicas corresponden a bombas más pequeñas.
2. Cada velocidad específica tiene su limitación dependiendo de las características de cavitación.
3. La selección de la velocidad de operación tiene sus limitaciones, sobre todo por lo que respecta a los motores eléctricos.
4. La eficiencia óptima de la bomba depende de la velocidad específica.
5. La velocidad específica se puede variar cambiando el número de paso o dividiendo la capacidad entre varias bombas.

<http://www.doschivos.com/neuen/bombcucv.htm>

CORRIENTE ELÉCTRICA

Corriente Alterna (CA) y Corriente Directa (CD).

La diferencia entre la Corriente Directa (CD) y la Corriente Alterna (CA) es que con la CD la corriente fluye solamente en una dirección, mientras que con la CA la dirección del flujo de corriente actual cambia periódicamente de dirección. En el caso de la CA común que se utiliza en la mayor parte del mundo, el flujo actual cambia de dirección 120 veces por segundo. Esta corriente se refiere a la "CA de 60 o ciclos" o "CA de 60 Hertz" en honor del Sr. Hertz que fue la primera persona que concibió el concepto de la corriente de la CA. Otra característica del flujo de corriente actual es que puede variar en cantidad, es decir, podemos tener un flujo de 5, 10 ó 100 Amperes, por ejemplo. Con la CD absoluta, esto significa que el flujo actual sería de 5, 10 ó 100 Amperes continuos (Figura 2.3).

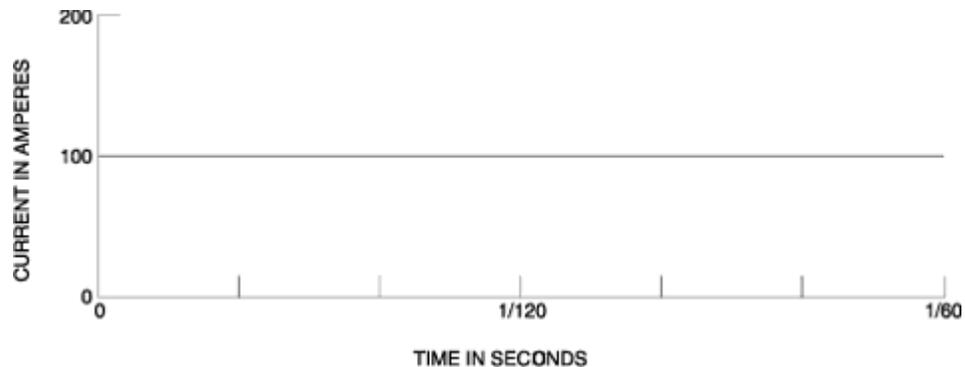


Figura 2.3. Visualización de la CD.

Con la CA es diferente, sería bastante difícil que la corriente fluya de desde el punto de vista de 100 amperios en una dirección positiva e inmediatamente después esté fluyendo con dirección negativa de igual intensidad. En lugar de eso, como la corriente se alista para cambiar de direcciones, primero disminuye hasta que alcanza el flujo cero y después se acumula gradualmente en la otra dirección (Figura 2.4). Observe que el flujo

actual máximo (los picos de la línea) en cada dirección es más que el valor especificado (100 Amperes). Lo que es importante en el estudio de motores, es darse cuenta de que la fuerza del campo magnético producido por una bobina electromagnética de CA, aumenta y disminuye con el incremento y disminución del flujo de corriente alterna.

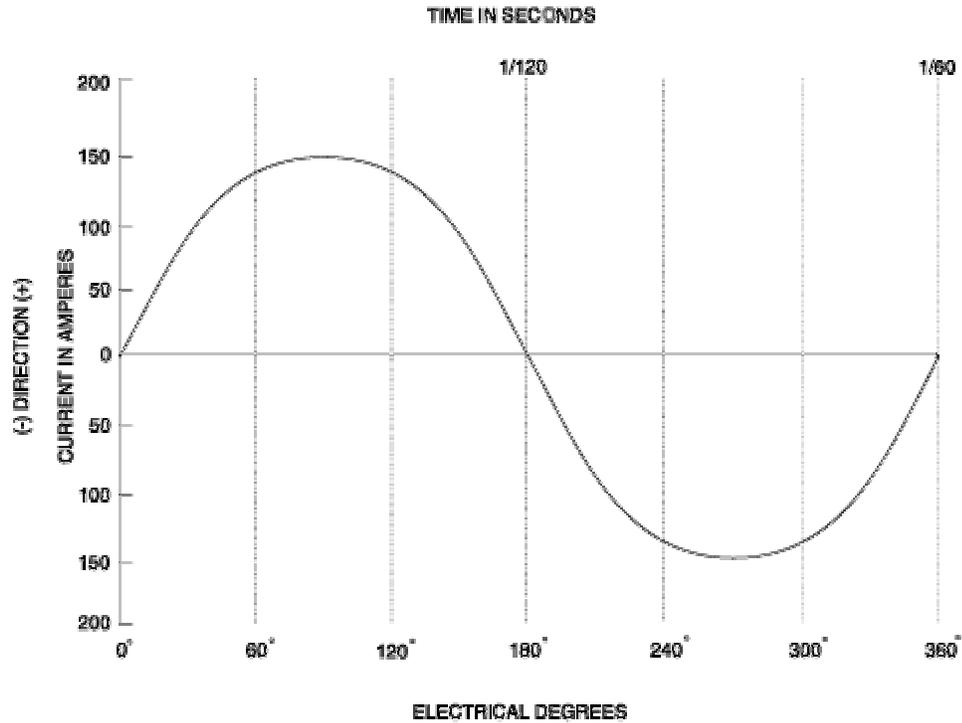


Figura 2.4 Visualización de la CA.

Potencia eléctrica

Lister E. (1977), la define como la energía consumida o el trabajo realizado por segundo por una corriente constante de 1 amperio circulando bajo la diferencia de potencial de 1 voltio, o

$$P = I * V \tag{Ec. 8}$$

En donde P = potencia eléctrica , Watts.

I = intensidad, amperio.

V = voltaje, voltios

MOTOR ELÉCTRICO

Introducción

El desarrollo del motor eléctrico nos ha dado los medios más eficientes y más eficaces para realizar un trabajo. Con el motor eléctrico hemos podido reducir notablemente el trabajo que realiza el hombre para su supervivencia, además, hemos podido construir una civilización que ahora está alcanzando las estrellas. El motor eléctrico es un dispositivo simple en principio, convierte energía eléctrica en energía mecánica. Al paso de los años, los motores eléctricos han cambiado substancialmente en diseño, no obstante los principios básicos de operación han seguido siendo iguales.

Descripción de los componentes del motor de CD.

El motor de corriente continua está compuesto de 2 piezas fundamentales (Rotor y Estator).

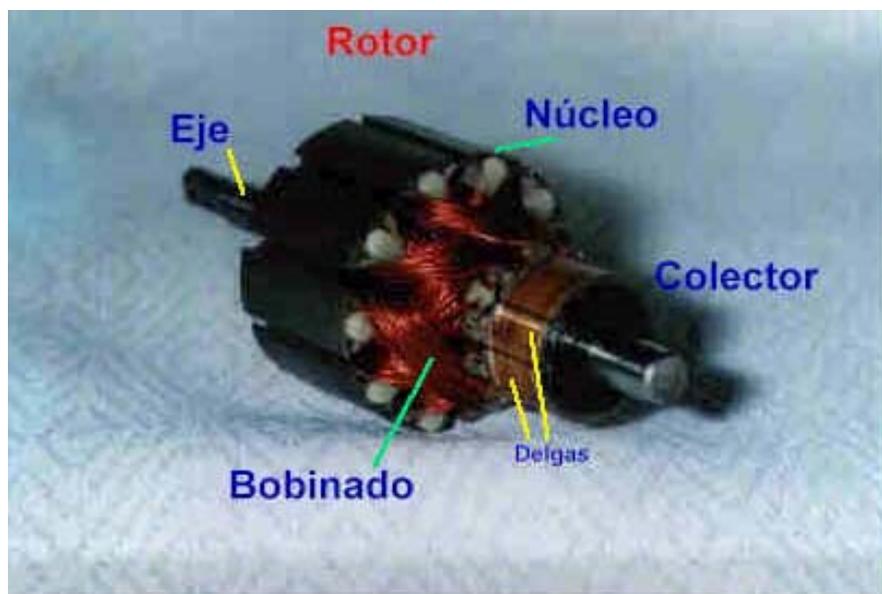


Figura 2.5 Piezas que componen el rotor.

Rotor

Constituye la parte móvil del motor, proporciona el torque para mover a la carga. Está formado por :

Eje: Formado por una barra de acero fresada. Imparte la rotación al núcleo, devanado y al colector.

Núcleo: Se localiza sobre el eje. Fabricado con capas laminadas de acero, su función es proporcionar un trayecto magnético entre los polos para que el flujo magnético del devanado circule.

Las laminaciones tienen por objeto reducir las corrientes parásitas en el núcleo. El acero del núcleo debe ser capaz de mantener bajas las pérdidas por histéresis. Este núcleo laminado contiene ranuras a lo largo de su superficie para albergar al devanado de la armadura (bobinado).

Devanado: Consta de bobinas aisladas entre sí y entre el núcleo de la armadura. Estas bobinas están alojadas en las ranuras, y están conectadas eléctricamente con el colector, el cual debido a su movimiento rotatorio, proporciona un camino de conducción conmutado.

Colector: Denominado también conmutador, está constituido de láminas de material conductor (delgas), separadas entre sí y del centro del eje por un material aislante, para evitar cortocircuito con dichos elementos. El colector se encuentra sobre uno de los extremos del eje del rotor, de modo que gira con éste y está en contacto con las escobillas.

La función del colector es recoger la tensión producida por el devanado inducido, transmitiéndola al circuito por medio de las escobillas (llamadas también cepillos)

Estator

Constituye la parte fija de la máquina. Su función es suministrar el flujo magnético que será usado por el bobinado del rotor para realizar su movimiento giratorio. Está formado por :

Armazón: Denominado también yugo, tiene dos funciones primordiales : servir como soporte y proporcionar una trayectoria de retorno al flujo magnético del rotor y del imán permanente, para completar el circuito magnético.



Figura 2.6 Partes que integran el estator.

Imán permanente: Compuesto de material ferromagnético altamente remanente, se encuentra fijado al armazón o carcaza del estator. Su función es proporcionar un campo magnético uniforme al devanado del rotor o armadura, de modo que interactúe con el campo formado por el bobinado, y se origine el movimiento del rotor como resultado de la interacción de estos campos.

Escobillas: Las escobillas están fabricadas de carbón, y poseen una dureza menor que la del colector, para evitar que éste se desgaste rápidamente. Se encuentran albergadas por los portaescobillas. Ambos, escobillas y portaescobillas, se encuentran en una de las tapas del estator.

La función de las escobillas es transmitir la tensión y corriente de la fuente de alimentación hacia el colector y, por consiguiente, al bobinado del rotor.

La función del portaescobillas es mantener a las escobillas en su posición de contacto firme con los segmentos del colector. Esta función la realiza por medio de resortes, los cuales hacen una presión moderada sobre las escobillas contra el colector. Esta presión debe mantenerse en un nivel intermedio pues, de ser excesiva, la fricción desgastaría tanto a las escobillas como al colector; por otro lado, de ser mínima esta presión, se produciría lo que se denomina "chisporroteo", que es cuando aparecen chispas entre las superficies del colector y las escobillas, debido a que no existe un buen contacto.

<http://alek.pucp.edu.pe/cursos/pregrado/iee215/motordc/descdc.htm>

Magnetismo

Dentro de los principios básicos que rigen el funcionamiento del motor eléctrico, se encuentra el magnetismo. Como se sabe un imán permanente atraerá objetos de metal cuando el objeto está cerca o en de contacto con dicho el imán. El imán puede hacer esta función permanente debido a su fuerza magnética inherente, referida como "campo magnético". El campo magnético de dos imanes permanentes es representado por las "líneas del flujo"(Figura 2.7). Estas líneas del flujo nos ayudan a visualizar el campo magnético de cualquier imán aunque representan solamente fenómenos invisibles. El número de líneas del flujo varía a partir de un campo magnético a otro. Cuanto más fuerte es el campo magnético, mayor es el número de las líneas del flujo que se dibujan para representar el campo magnético. Las líneas del flujo se dibujan con una dirección indicada puesto que debemos visualizar estas líneas y el campo magnético que representan movimientos que van del polo N al polo S, según lo

demostrado en la Figura 2.7. Un campo magnético similar, se produce alrededor de un conductor eléctrico, cuando circula corriente eléctrica a través de él, según lo demostrado en la Figura 2.8. Estas líneas del flujo definen el campo magnético y están en la forma de círculos concéntricos alrededor del alambre.

La "regla de la mano izquierda" (Figura 2.8), indica que si se señala con el pulgar de su mano izquierda la dirección de la corriente, los dedos señalarán la dirección que presenta el campo magnético.

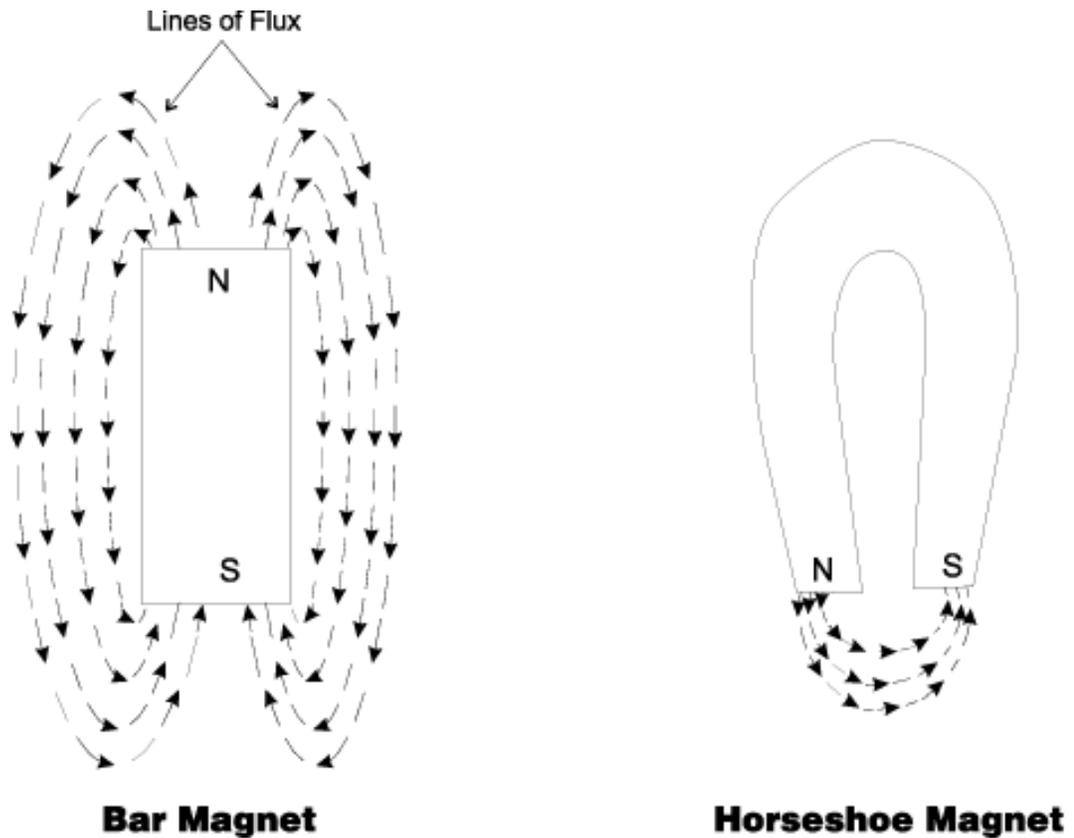


Figura 2.7 Dirección de las líneas del flujo de un campo magnético.

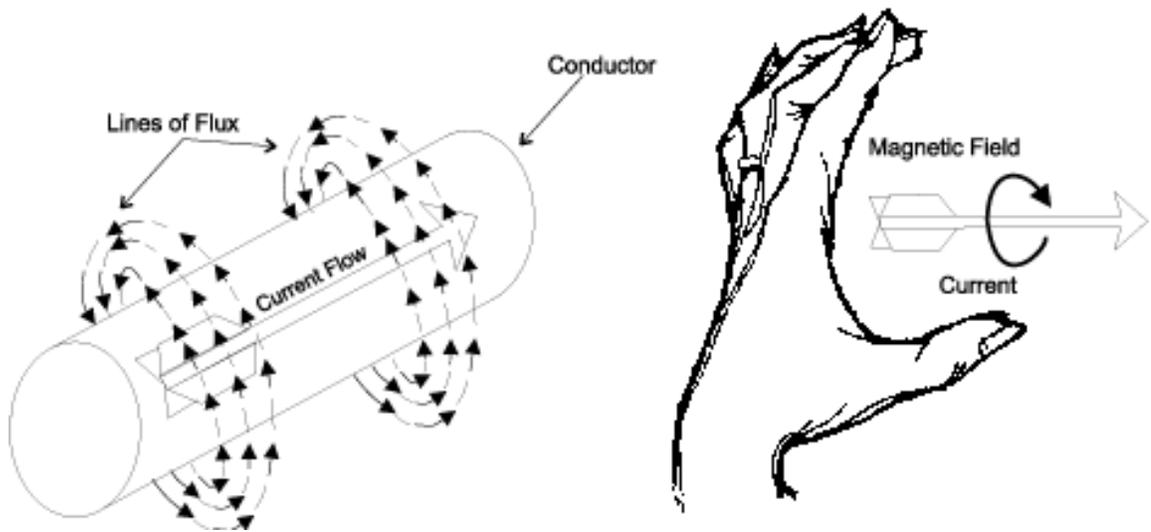


Figura 2.8. Campo magnético representado por las líneas concéntricas alrededor del conductor.



Figura 2.9. Las líneas magnéticas que circulan alrededor de un conductor salen del polo N y entran al polo S.

Cuando un alambre forma una bobina (véase Figura 2.9), todas las líneas individuales del flujo producidas por cada sección del alambre forman un gran campo magnético alrededor de la bobina. Como con el imán permanente, estas líneas del flujo dejan el norte de la bobina y vuelven a entrar la bobina por el polo sur. El campo magnético de una bobina de alambre es mucho mayor que el campo magnético generado alrededor de un simple conductor antes de ser formada en una bobina. Este campo magnético alrededor de la bobina puede ser consolidado aún más colocando una base de hierro o de metal similar en el centro de la base. La base del metal presenta menos resistencia a las líneas del flujo que al aire, de tal modo la fuerza del campo puede aumentar. (así es como se realiza la bobina del estator, bobina de alambre con base de acero). La ventaja de un campo magnético que sea producido por una bobina, es que cuando se invierte la corriente, los postes cambian de dirección debido al cambio de dirección flujo magnético (Figura 2.10). Si este fenómeno magnético no se presentara, el motor eléctrico no existiría.

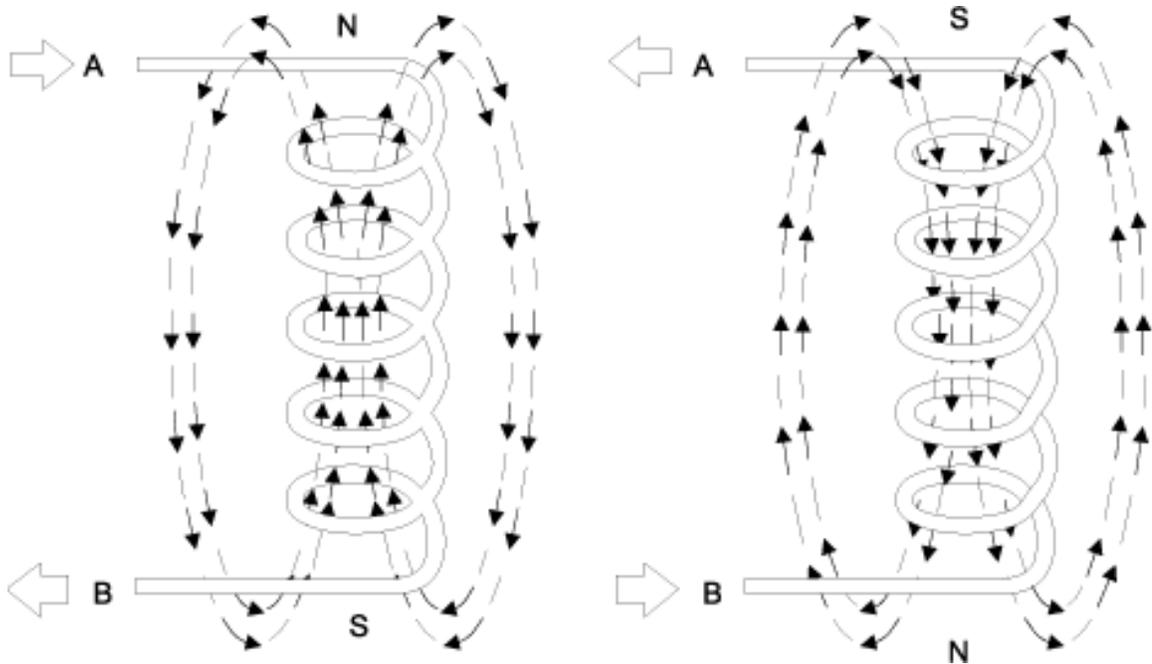


Figura 2.10. Cambio de los polos de una bobina electromagnética cuando la dirección del flujo de la corriente cambia.

Propulsión magnética del motor

El principio de operación de los motores se puede demostrar fácilmente usando dos electroimanes y un imán permanente. La corriente se pasa a través de la bobina No. 1 en dirección al polo Norte establecido y a través de la bobina No. 2 en dirección al polo Sur. Un imán permanente con un polo Norte y Sur es la pieza móvil de este motor simple. En la figura 2.11-A, el polo Norte del imán permanente está enfrente del polo Norte del electroimán. De manera semejante, los polos Sur están uno enfrente del otro. Como los polos magnéticos iguales se rechazan, empieza a girar el imán permanente. Cuando la fuerza de atracción entre los polos opuestos llega a ser lo suficientemente fuerte, el imán gira permanente. El imán rotativo continúa cambiando de dirección hasta que los polos opuestos se alinean. En este punto el rotor normalmente se detendría por la atracción entre los polos diferentes (Figura 2.11-B).

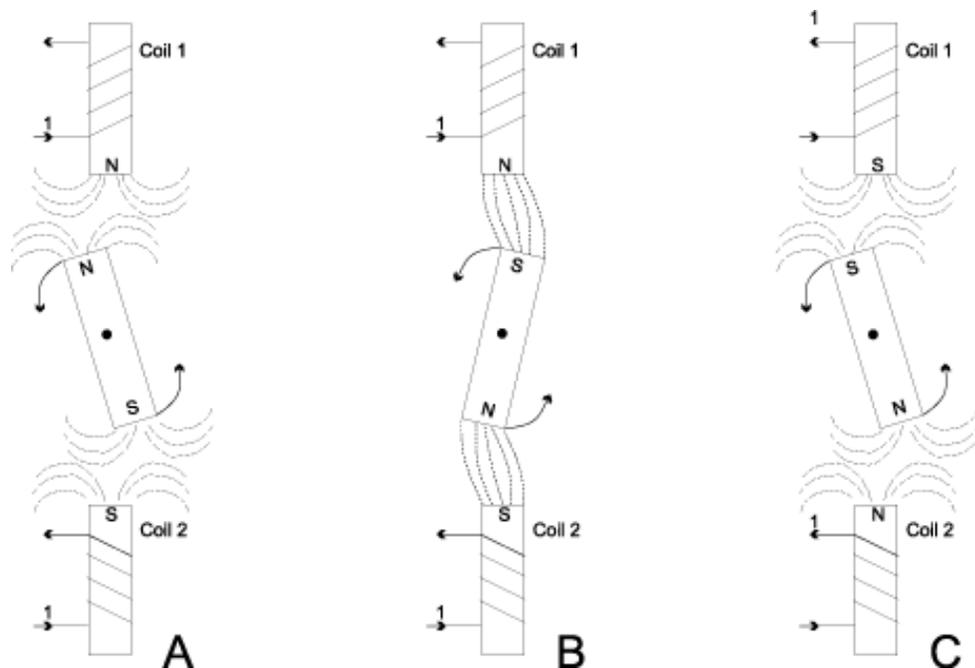


Figura 2.11. Propulsión magnética del motor

Sí la dirección de corrientes en las bobinas electromagnéticas fuera invertida repentinamente, por consiguiente se invierte la polaridad de las dos bobinas, entonces, los polos otra vez sería opuestos y se repelerían entre ellos (Figura 2.11-C). Por lo tanto, el imán permanente continuaría rotando. Si la dirección actual en las bobinas electromagnéticas fuera cambiada todo el tiempo, el imán daría vuelta 180 grados a medio camino, entonces el imán continuaría rotando. Este dispositivo sencillo es un motor en su forma más simple. Un motor real es más complejo, sin embargo, el principio es igual.

Operación básica del motor eléctrico

Al igual que el motor de CD, Un motor de CA tiene dos partes eléctricas básicas: un "estator" y un "rotor", como se muestra en la Figura 2.12. El estator está en el componente eléctrico estático. Consiste en un grupo de electroimanes individuales dispuestos de una manera tal que formen un cilindro hueco, con un polo de cada cara de los imanes hacia el centro del grupo. El rotor es el componente eléctrico rotativo, el cual consiste en un grupo de electroimanes dispuestos alrededor de un cilindro, con los polos haciendo frente hacia los polos del estator. El rotor, está situado obviamente dentro del estator y montado en el eje del motor. El objetivo de estos componentes del motor es hacer que el rotor gire sobre el eje del motor. Esta rotación ocurrirá debido al fenómeno magnético previamente discutido que los polos opuestos se atraen y polos iguales se rechazan. Si cambiamos progresivamente la polaridad de los polos del estator de una manera tal que su campo magnético combinado rote, entonces el rotor seguirá girando con el campo magnético del estator.

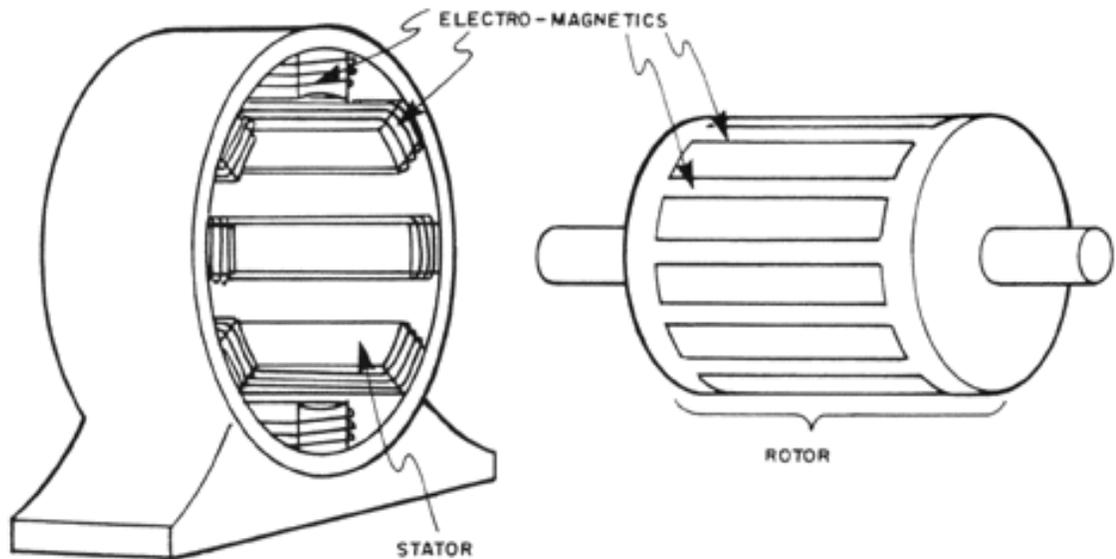


Figura 2.12 Componentes eléctricos básicos de un motor de CA.

En la Figura 2.13 se muestra como van rotando los campos magnéticos del estator. De acuerdo con la figura, el estator tiene seis polos magnéticos y el rotor tiene dos polos. En el tiempo 1, los polos A-1 del estator y el C-2 son polos Norte y los polos opuestos, A-2 y C-1, son los polos sur. El polo S del rotor es atraído por los dos polos N del estator y el polo N del rotor es atraído por los dos polos del sur del estator. En el tiempo 2, la polaridad de los postes del estator se cambia de modo que ahora el C-2 y B-1 son los polos N y C-1 y B-2 son los polos S. Entonces el rotor se ve forzado a rotar 60 grados para alinearse con los polos del estator según lo demostrado en la figura. En el tiempo 3, B-1 y A-2 son los polos N. En el tiempo 4, A-2 y C-1 son los polos N. Mientras que se realiza cada cambio, los polos del rotor son atraídos por los polos opuestos en el estator. Así, como el campo magnético del estator rota, el rotor se ve forzado a rotar con él.

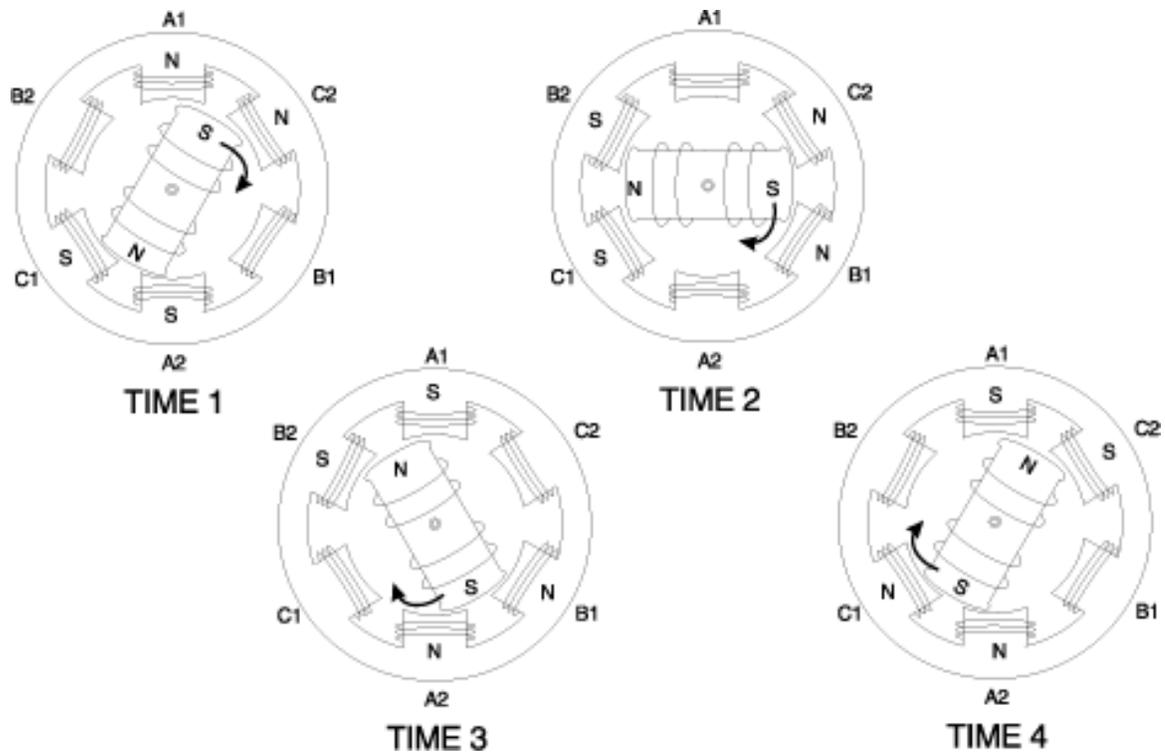


Figura 2.13. Rotación del campo magnético de un motor de CA.

<http://www.conae.gob.mx/wb/distribuidor.jsp?seccion=2369>

ENERGÍA FOTOVOLTAICA

El recurso solar

El sol es una fuente inagotable de energía debido a las reacciones nucleares que ocurren en su centro. Una gran parte de esta energía llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética, la luz solar que podemos percibir está el espectro que abarca desde 0.2 hasta 2.6 μm .

A medida que la radiación atraviesa la atmósfera terrestre sufre atenuación por los procesos de absorción, reflexión y refracción. Tales procesos se verifican cuando los rayos de luz chocan con las nubes o con el vapor de agua existente en la atmósfera. La radiación que llega a la superficie terrestre se puede clasificar en directa y difusa.

La **radiación directa** es aquella que se recibe en la superficie terrestre sin que esta haya sufrido ninguno de los procesos antes mencionados al pasar por la atmósfera.

La **radiación difusa** es la que se recibe después de haber cambiado su dirección por los procesos de refracción y reflexión que ocurren en la atmósfera. En un día nublado, la radiación solar recibida es sólo difusa, ya que la radiación directa es obstruida por las nubes.

La energía de la radiación solar que se recibe en una superficie determinada en un instante dado se le conoce como **Irradiancia** y se mide en unidades de Watts por metro cuadrado (W/m^2). La irradiancia es un valor distinto para cada instante, es decir se espera que en un día despejado la irradiancia a las 10:00 A.M. será diferente y menor a la que se obtiene a las 1:00 P.M., esto se debe al movimiento de rotación de la tierra (movimiento sobre su propio eje).

Otro concepto importante es el de **Insolación**, éste corresponde a la integración de la irradiancia en un período determinado. En otras palabras es la energía radiante que incide en una superficie de área conocida en un intervalo de tiempo dado. Este término tiene unidades de energía por área, comúnmente Watts-hora por metro cuadrado ($W-h/m^2$). Generalmente se reporta este valor como una acumulación de energía horaria, diaria, estacional o anual. La insolación también se expresa en términos de horas solares pico. Una hora de energía es equivalente a la energía recibida durante una hora, a una irradiancia promedio de $1,000 W/m^2$ (Figura 2.14). La energía útil que produce el arreglo fotovoltaico es directamente proporcional a la insolación que recibe.

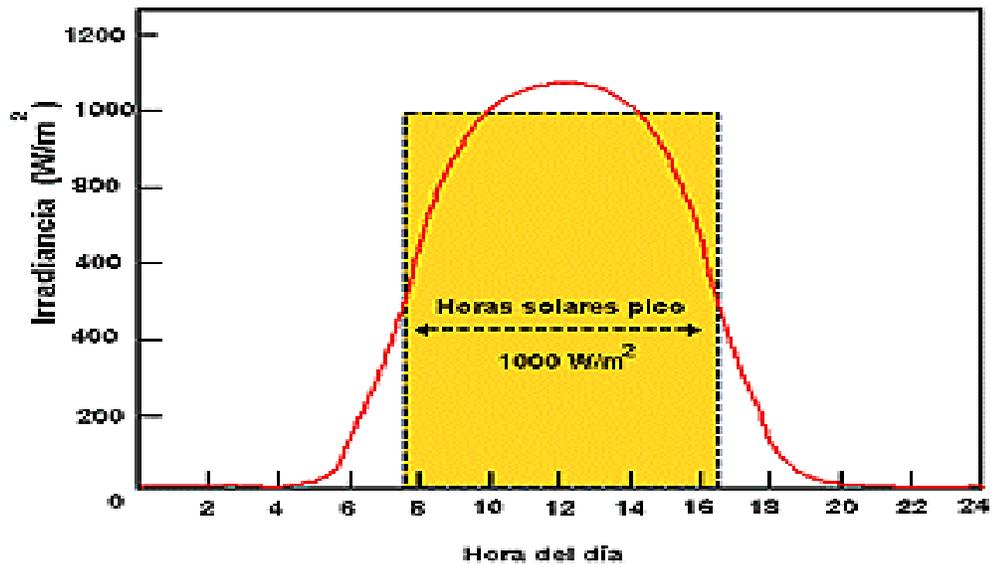


Figura 2.14. Irradiancia y horas solares pico (insolación) durante un día soleado.

La trayectoria solar

Además de las condiciones atmosféricas hay otro parámetro que afecta radicalmente a la incidencia de la radiación sobre un captador solar, este es el **movimiento aparente del sol** a lo largo del día y a lo largo del año, (Figura 2.15). Se dice "aparente" porque en realidad la Tierra es la que está girando y no el Sol. La Tierra tiene dos tipos de movimientos: uno alrededor de su propio eje (llamado movimiento rotacional) el cual da lugar al día y la noche y el otro; es alrededor del sol (llamado movimiento traslacional) siguiendo una trayectoria elíptica, el cual da lugar a las estaciones del año.

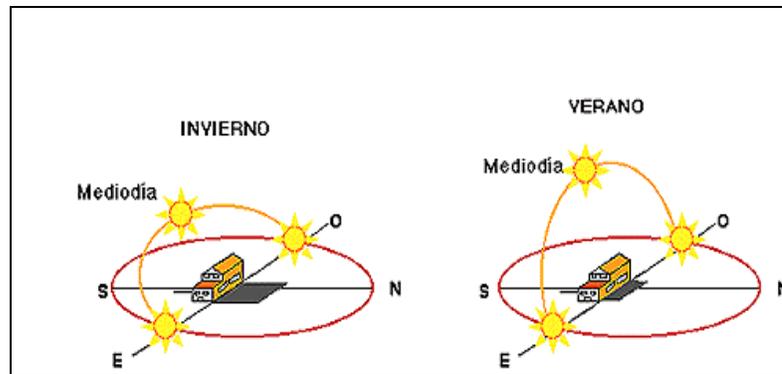


Figura 2.15. Movimiento aparente del sol en la bóveda celeste en función de la hora del día y la época del año.

El efecto fotovoltaico.

Rapport (1959), propone la definición más apropiada del efecto fotovoltaico, como “ La generación de un potencial eléctrico cuando una radiación ioniza la región cercana a la barrera de potencial de un semiconductor. Se caracteriza por una fuerza electromotriz auto generada y la habilidad para entregar potencia a una carga” proviniendo la potencia primaria de la radiación ionizante.

La celda solar es el dispositivo fotovoltaico más básico para producir energía eléctrica en corriente directa (CD) o continua (CC) a partir de la energía solar.

Los semiconductores son utilizados en la fabricación de las celdas solares porque la energía que liga a los electrones de valencia al núcleo es similar a la energía que poseen los fotones que constituyen a la luz solar. Por lo tanto, cuando la luz solar incide sobre el semiconductor (generalmente silicio), sus fotones suministran la cantidad de energía necesaria para liberar electrones de valencia de los átomos de silicio creando dos cargas libres, una positiva y otra negativa. Por cada electrón que se libera, aparece un hueco.

Dichos huecos se comportan como partículas con carga positiva (+). El equilibrio eléctrico de la juntura N-P se ve alterado por la presencia de estas nuevas cargas libres.

Estos portadores fotogenerados son forzados a separarse por medio de un campo eléctrico interno, construido para ese fin, que obliga a los electrones a acumularse en una superficie del dispositivo, y a los huecos, en la otra superficie.

El silicio en su forma cristalina pura, es un semiconductor, con muy pocas cargas libres dentro de él. Su resistividad es muy elevada. Usando un proceso llamado de difusión se puede introducir pequeñas cantidades de otros elementos químicos, los que permiten decrecer el valor inicial de la resistividad, creando, al mismo tiempo, zonas con diferentes tipos de carga. La célula fotovoltaica (FV) utiliza dos tipos de materiales semiconductores, el tipo N y el tipo P.

Se conoce como semiconductor del tipo N (negativo), cuando la sustancia difusa cede fácilmente electrones, dentro del semiconductor se crea una zona que tiene un *exceso de cargas negativas* (electrones).

Cuando la sustancia difusa atrapa electrones libres, los átomos que los pierden quedan cargados positivamente. En esta zona *predominan las cargas positivas* (*holes*, en inglés) obteniéndose un semiconductor del tipo P (positivo).

El proceso de difusión es continuo, permitiendo la formación, en el mismo material, de dos zonas semiconductoras adyacentes, una del tipo N; la otra del tipo P. El espacio que separa ambas zonas es la juntura de transición (*junction*, en inglés).

La teoría muestra que las cargas mayoritarias en una zona se desplazan hacia la de baja densidad en la zona opuesta. El desplazamiento de las cargas

negativas y positivas deja a la zona de la juntura totalmente libre de cargas. Las zonas adyacentes a la misma tienen concentraciones de carga minoritarias (cargas negativas en el lado P y cargas positivas en el lado N). La acumulación de estas cargas a ambos lados de la juntura crea una diferencia de voltaje que impide la continuación del desplazamiento inicial.

La *corriente de desplazamiento se anula*. Se dice entonces que la juntura N-P ha alcanzado el estado de equilibrio, el que es ilustrado en la Fig. 2.16.

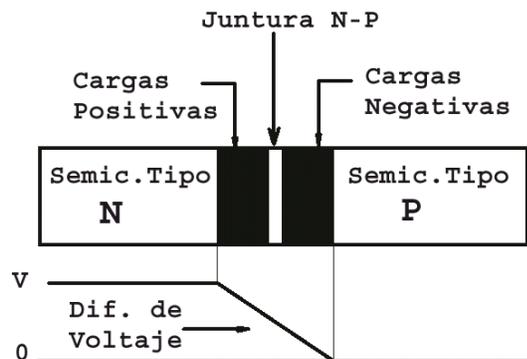


Figura. 2.16. Juntura N-P en Equilibrio.

En la fabricación de las celdas solares los lingotes de silicio son rebanados en forma de placas delgadas llamadas obleas. El espesor típico usado es del orden de 300 μm (0.3 mm). Una fracción muy pequeña de tal espesor (del orden de 0.5 μm) es impregnado con átomos de fósforo. A esta capa se le conoce como tipo-N. El resto de la oblea es impregnado con átomos de boro y se forma la capa conocida como tipo-P. Estas capas forman un campo eléctrico (voltaje interno construido) dentro de la oblea y cerca de la superficie que recibe la luz del sol. Dicho voltaje es el responsable de separar a las cargas fotogeneradas positivas (huecos) y negativas (electrones).

La celda cuenta con dos terminales que se conectan a un circuito externo para extraer la corriente eléctrica producida. La cara de la oblea expuesta a la luz, posee un enrejado metálico muy fino (plata y/o aluminio), el cual colecta los electrones foto generados. Esta capa corresponde a la terminal negativa. Sobre este enrejado está conectado uno de los conductores del circuito

exterior. La otra cara cuenta con una capa metálica, usualmente de aluminio. Esta corresponde a la terminal positiva ya que en ella se acumulan las cargas positivas. Sobre esta capa está conectado el otro conductor del circuito exterior. También la celda esta cubierta con una película delgada antireflejante para disminuir las pérdidas por reflexión.

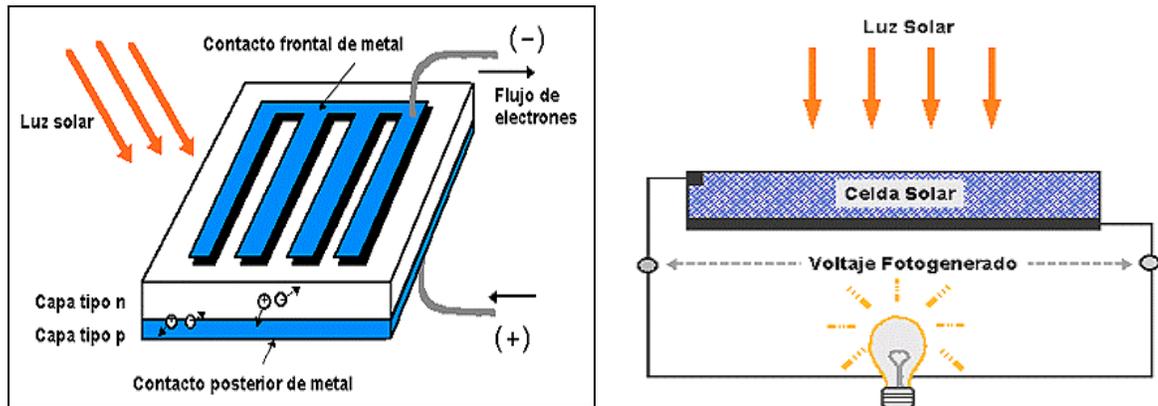


Figura 2.17. Generación de electricidad en una celda fotovoltaica.

<http://www.re.sandia.gov/wp/wpGuia/energia.html>

CLASIFICACIÓN DE LAS CELDAS SOLARES

Dependiendo de la estructura cristalina del silicio las celdas solares se clasifican en:

Silicio Monocristalino: Las celdas están hechas de un solo cristal de silicio de muy alta pureza. La eficiencia de estos módulos ha llegado hasta el 17%. Los módulos con estas celdas son los más maduros del mercado, proporcionando con esto confiabilidad en el dispositivo de tal manera que algunos fabricantes los garantizan hasta por 25 años.

Silicio Policristalino: Su nombre indica que estas celdas están formadas por varios cristales de silicio. Esta tecnología fue desarrollada buscando disminuir los costos de fabricación. Dichas celdas presentan eficiencias de conversión un

poco inferiores a las monocristalinas pero se ha encontrado que pueden obtenerse hasta un orden de 15%. La garantía del producto puede ser hasta por 20 años dependiendo del fabricante.

Silicio Amorfo: La palabra amorfo significa carencia de estructura debido a su método de fabricación que consiste en depositar el silicio y los demás aditivos sobre un sustrato. La estructura cristalina de estas celdas no tiene un patrón ordenado característico del silicio cristalino. La tecnología de estos módulos ha estado cambiando aceleradamente en los últimos años. En la actualidad su eficiencia ha subido hasta establecerse en el rango de 5 a 10% y promete incrementarse. La garantía del producto puede ser hasta por 10 años dependiendo del fabricante.

Módulos fotovoltaicos

Un módulo solar o fotovoltaico, este conjunto de celdas que están convenientemente conectadas eléctricamente, de tal forma que reúnan las condiciones óptimas para su integración en sistemas de generación de energía, siendo compatibles con las necesidades y los equipos estándares existentes en el mercado. Las celdas se pueden conectar en serie o en paralelo.

Comercialmente, las celdas solares se conectan en serie, se agrupan, se enlaminan y se empaquetan entre hojas de plástico y vidrio, formando la unidad del módulo solar. El módulo tiene un marco (usualmente de aluminio) que le da rigidez y facilidad en el manejo y transportación. Además, en éste se encuentran las cajas de conexiones eléctricas para conectar el cableado exterior. El número de celdas que contienen los módulos depende de la aplicación para la que se necesita. Es costumbre configurar el número de celdas conectadas en serie para tener módulos que sirvan para cargar acumuladores (o baterías) de 12 volts. Se pueden encontrar generalmente módulos de 36 celdas conectadas en serie. Estos módulos proporcionan un

voltaje de salida que sirve para cargar baterías a 12 volts, incluyendo las pérdidas de voltaje en los circuitos eléctricos así como en los sistemas de control y manejo de energía.

El comportamiento eléctrico de los módulos está dado por las curvas de corriente contra voltaje (curva IV) o potencia contra voltaje (curva PV) que los caracteriza.

La curva de potencia se genera multiplicando la corriente y el voltaje en cada punto de la curva IV. La Figura 2.24 muestran curvas IV y PV para un módulo fotovoltaico típico. Bajo condiciones estándares de prueba (irradiancia de 1kW/m^2 y temperatura de celda de $25\text{ }^\circ\text{C}$), cada modelo de módulo tiene una curva IV (o PV) característica. En la curva de potencia contra voltaje, la potencia máxima (P_p) es la capacidad nominal o tamaño del módulo. La corriente y el voltaje en el punto de máxima potencia (I_p y V_p) corresponden a la corriente nominal y voltaje nominal del módulo, respectivamente.

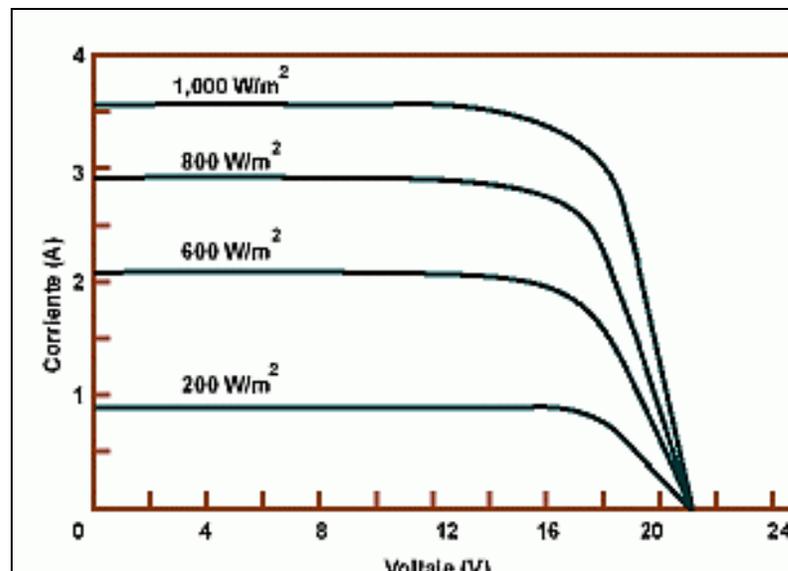


Figura 2.18. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de radiación (temperatura constante $25\text{ }^\circ\text{C}$).

Otros parámetros de importancia son la corriente de corto circuito (I_{cc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{ca}).

- ✓ **Corriente a corto circuito I_{cc} (I_{sc}):** en sus signos de inglés: Es la máxima corriente generada por la módulo solar y se mide cuando se conecta un circuito exterior a la celda con resistencia nula. La unidad de medición es el amper. Su valor depende del área superficial y de la radiación luminosa.
- ✓ **Voltaje a circuito abierto V_{ca} (V_{oc}):** Es el voltaje máximo que genera una módulo solar. Su unidad de medición es el volt. Este voltaje se mide cuando no existe un circuito externo conectado a la celda.

Es importante notar que cuando el módulo opera lejos del punto de máxima potencia, la potencia entregada se reduce significativamente.

La potencia máxima o tamaño de los módulos comerciales varía entre 25 y 300 Watts. El voltaje nominal de la mayoría de los módulos fluctúa entre los 16 y 17.5 voltios. Cada módulos tiene en su parte posterior una placa del fabricante con el modelo y las especificaciones eléctricas.

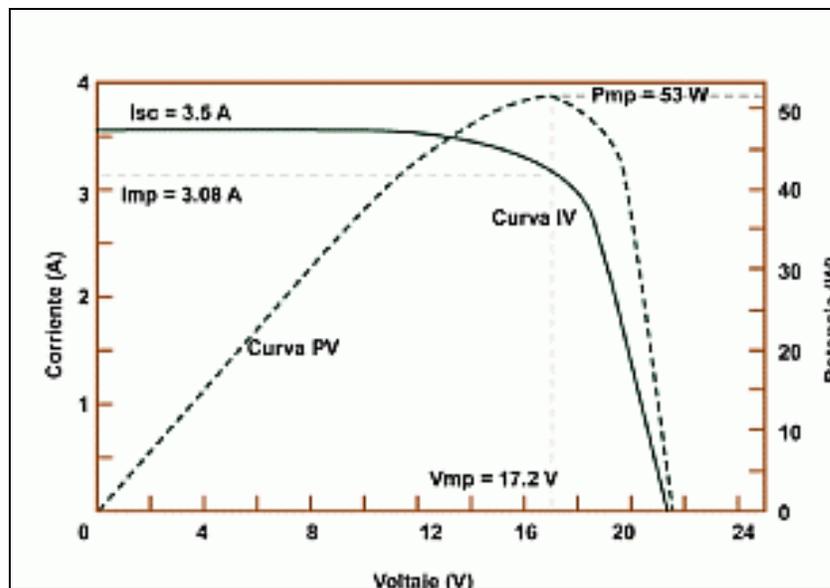


Figura 2.19. Curva IV y PV para un módulo fotovoltaico típico a $1,000 \text{ W/m}^2$ y 25°C

El funcionamiento del módulo fotovoltaico se ve afectado por la intensidad de la radiación y de la temperatura. La Figura 2.19 muestra el

comportamiento de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de la radiación solar. Se presenta un aumento proporcional de la corriente producida con el aumento de la intensidad. También se debe observar que el voltaje a circuito abierto V_{ca} , no cambio lo cual demuestra su estabilidad frente a los cambios de iluminación. En la Figura 2.20 se muestra el efecto que produce la temperatura sobre la producción de corriente en el módulo. Esta vez, el efecto se manifiesta en el voltaje del módulo. La potencia nominal se reduce aproximadamente 0.5% por cada grado centígrado por encima de 25 °C.

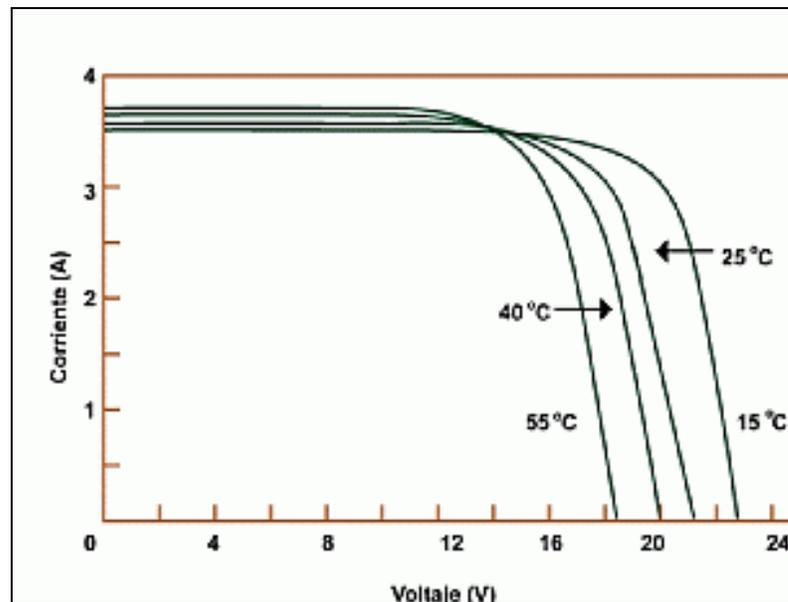


Figura 2.20. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes temperaturas de operación (irradiancia constante 1 000 W/m²).

Arreglos fotovoltaicos

Un arreglo FV es un conjunto de módulos conectados eléctricamente en serie o paralelo. Las características eléctricas del arreglo son análogas a la de módulos individuales, con la potencia, corriente y voltaje modificados de acuerdo al número de módulos conectados en serie y en paralelo.

Incrementando el voltaje: Los módulos solares se conectan en serie para obtener voltajes de salida mas grandes. El voltaje de salida, V_s , de módulos conectados en serie esta dado por la suma de los voltajes generados por cada módulo.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (\text{Ec. 9})$$

Una forma fácil de entender el concepto de sistemas conectados en serie, es mediante la analogía presentada en la Figura 2.21 entre un sistema hidráulico y un eléctrico. Como se puede observar en el sistema hidráulico (izquierda) el agua que cae desde cuatro veces la altura de 12 metros produce una caída de agua con cuatro veces la presión a la misma tasa de flujo, 2 L/s. La cual se puede comprar con los 48 voltios que el sistema eléctrico (derecha) alcanza al pasar una corriente de 2 amperios por cuatro módulos conectados en serie. La corriente se compara con el flujo ya que ambas permanecen constantes en el circuito, y el voltaje es análogo al papel de la presión en el sistema hidráulico.

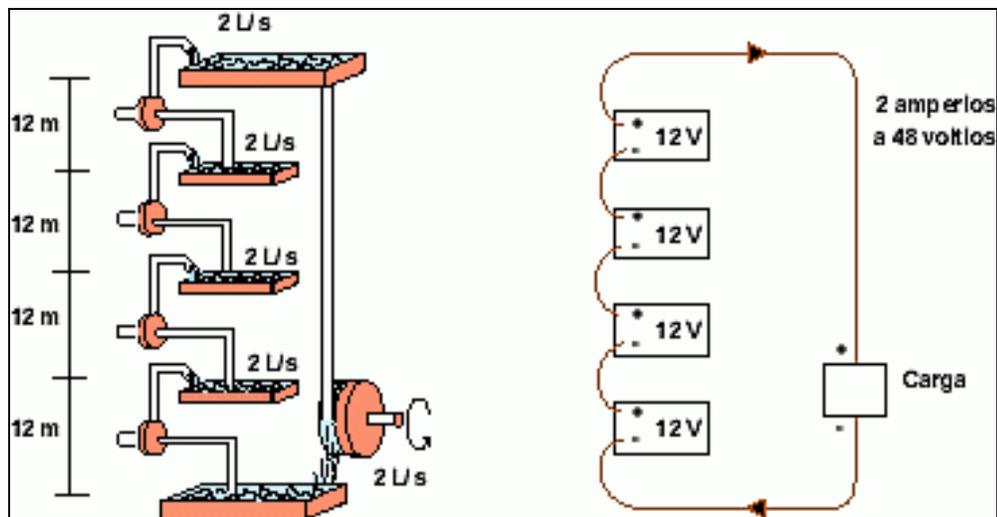


Figura 2.21. Analogía de una conexión en serie entre un sistema eléctrico y un hidráulico.

Incrementando la corriente: Los módulos solares o paneles se conectan en paralelo para obtener corrientes generadas mas grandes. El

voltaje del conjunto es el mismo que el de un módulo (o un panel); pero la corriente de salida, I_s , es la suma de cada unidad conectada en paralelo.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (\text{Ec. 10})$$

De manera similar al sistema conectado en serie, los sistemas conectados en paralelo también pueden ser comparados en un sistema hidráulico, tal y como se muestra en la Figura 2.22. En el sistema hidráulico (arriba) el agua que cae de la misma altura, da la misma presión que cada bomba individual, pero el flujo es igual al total de los flujos de toda las bombas. Entonces en el sistema eléctrico, el voltaje permanece constante y la corriente de salida de los cuatro módulos es sumada, produciendo 8 amperes de corriente a 12 voltios.

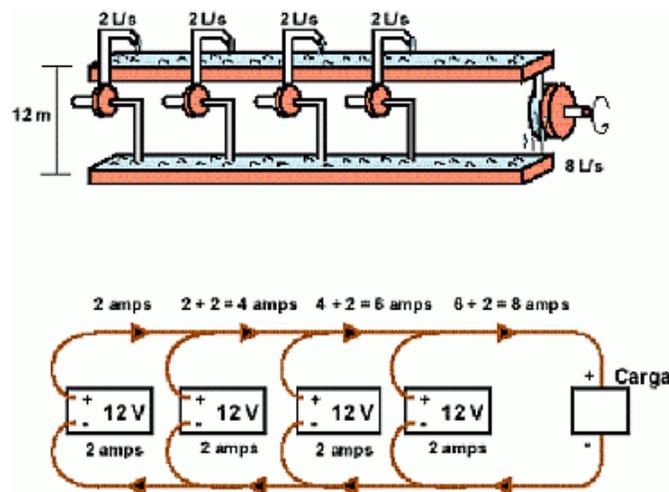


Figura 2.22. Analogía de una conexión en paralelo entre un sistema eléctrico y un hidráulico.

Inclinación del arreglo fotovoltaico

La máxima energía se obtiene cuando los rayos solares llegan perpendiculares a la superficie del captador. En el caso de arreglos fotovoltaicos la perpendicularidad entre las superficies de los módulos y los

rayos solares solo se puede conseguir si las estructuras de montaje del arreglo se mueven siguiendo al Sol.

Existen estructuras de soporte del arreglo que ajustan automáticamente el azimut y/o la elevación. Estas estructuras de montaje se llaman **seguidores**. Generalmente el ángulo de elevación del arreglo es fijo. En algunos casos se usan seguidores azimutales. Dependiendo de la latitud del lugar, los seguidores azimutales pueden incrementar la insolación promedio anual en un 15-25%.

En el caso de que no se tenga un seguidor solar, el arreglo se monta en una estructura fija como se muestra en la Figura 2.22. Este montaje tiene la ventaja de ser muy sencillo. Debido a que el ángulo de elevación del Sol cambia durante el año, se debe tener un criterio de selección del ángulo óptimo del arreglo que garantice la máxima producción de energía eléctrica. En el hemisferio Norte el Sol se declina hacia el Sur, por lo cual se requiere que los arreglos fijos se coloquen inclinados (respecto de la horizontal) viendo hacia el Sur.

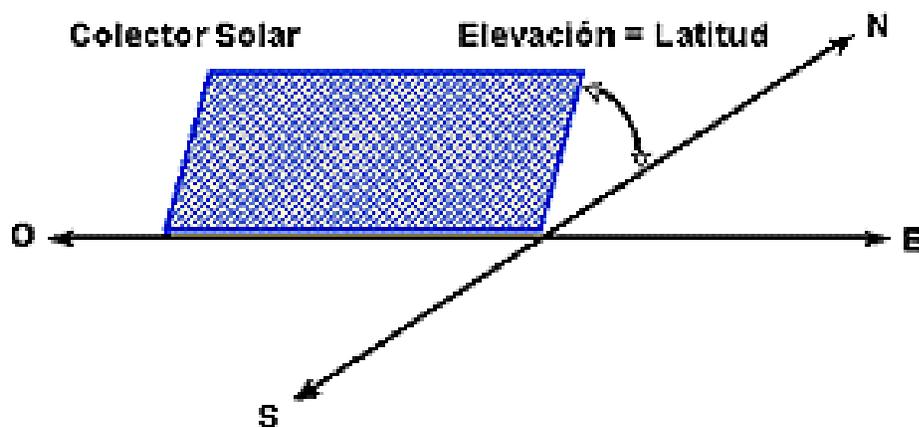


Figura 2.23. Orientación de una estructura fija para maximizar la captación de radiación solar a lo largo del año.

<http://www.re.sandia.gov/wp/wpGuia/energia.html>

III. MATERIALES Y METODOS

SITIO EXPERIMENTAL

Ubicación geográfica.

La presente investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, ubicada en Buenavista, municipio de Saltillo, Coahuila y cuyas coordenadas geográficas son 25° 21' 20" de Latitud Norte y 101° 01' 30" de Longitud Oeste y a una altitud media sobre el nivel del mar de 1743 m.

Clima.

De acuerdo al sistema de Köppen modificado por E. García (1964), el clima de la región comprendida para Buenavista, Saltillo, Coahuila., es representado por Bso K(x') (e); donde los términos significan:

Bso.- Es el más seco de los BS, con un coeficiente de P/T .

K.- Templado con verano cálido, temperatura media anual entre 12 y 18°, la del mes más frío entre -3 y 18°C y la del mes más caliente de 18°C.

x'.- Régimen de lluvia intermedio entre verano e invierno.

La precipitación media anual es de 345 milímetros.

Los meses lluviosos en el año son de junio a septiembre, siendo el más lluvioso el mes de junio.

Descripción del área de trabajo

Las evaluaciones o pruebas de bombeo se llevaron a cabo en el Jardín hidráulico del Departamento de Riego y Drenaje de esta universidad, el cual dentro de sus instalaciones cuenta con un depósito-pila de concreto (con una capacidad de aproximadamente 13 689 m³), de donde se extraía el agua en este sitio. Así también varias de las mediciones eléctricas e hidráulicas realizadas sobre las bombas centrífugas fueron hechas en el Departamento de Agrofísica, en este lugar el agua que se bombeaba se encontraba almacenada en un contenedor de plástico con capacidad 200 litros.

MATERIAL UTILIZADO

Equipo eléctrico

En la parte eléctrica se utilizaron los siguientes materiales:

- 2 Motores eléctricos de corriente continua, Marca: Ford SIEMENS, Modelo: FTS1006Q.
- 2 Paneles solares, Marca: KYOCERA CORPORATION, Modelo: KC50
- 1 Controlador de carga, Marca: SUNPOWER, Modelo: SCI-120 .
- 2 Multímetros digitales, Marca: PROAM STEREN, Modelo: MUL-010.
- 2 Acumuladores, Marca: LTH, Modelo: L-24M/DC-140.
- 10 Metros de cable eléctrico, 12 AWG, NOM 340.
- 1 Switch eléctrico, Modelo: 82606.
- 8 Terminales de latón redondo hembra y macho, Modelo: TRHA-156L.

Equipo hidráulico

Los materiales utilizados para la realización de las pruebas hidráulicas, son los que a continuación se mencionan:

- 1 Depósito-pila de concreto.
- 1 Contenedor de plástico.
- 1 Bomba centrífuga, Modelo: 3225BC.25, Diámetro de succión: 1¼", Diámetro de descarga: 1".
- 2 Tee's reforzada galvanizada, ¾" .
- 1 Reducción Bushing galvanizada 1 ¼" - 1" .
- 1 Reducción Bushing galvanizada 1" - ¾" .
- 3 m de Tubo PVC, RD 21, Diámetro 1" y 3 m de tubo PVC, ¾".
- 2 Niples galvanizados, 1" * 2" y 4 de ¾" * 2".
- 2 Codos hidráulicos de PVC, 1" * 90° y ¾" * 90°.
- 10 Adaptadores macho 1" y ¾" .
- 10 adaptadores hembra, 1" y ¾".
- 2 Válvulas de pie o pichanchas de ¾" y de 1" .
- 2 Válvulas tipo Globo de ¾".

Instrumentos de medición y herramientas

En el ensamble e instalación de los aparatos así como en la realización de las pruebas se empleó el siguiente equipo de trabajo:

- 1 Tacómetro digital marca: SPM instrument, Modelo: A2010
- 1 Tacómetro de bolsillo, Marca VEEDER-ROOT.
- 1 Cronómetro, Marca CASIO, Modelo: F-105.
- 1 Probeta graduada de 1 litro.
- 1 Cinta métrica.
- 1 Manómetro de bourdon de 1 Kg/cm² de capacidad.
- 1 Manómetro de bourdon con glicerina de 60 PSI de capacidad.

1 Vacuómetro de 30 pies de vacío, marca: Soiltest, Inc. Modelo: K-1021

1 Llave Stilson.

1 Llave Perica

1 Cinta teflón.

1 Desarmador

1 Segueta.

Descripción de las bombas centrífugas evaluadas.

El experimento se realizó con dos bombas centrífugas cuyas especificaciones son las siguientes:

Bomba número 1

Bomba centrífuga modelo 3225BC.25, impulsor tipo cerrado de bronce, con diámetro de succión 1 ¼ " y descarga de 1" y motor eléctrico de corriente continua, marca: Ford, voltaje nominal de entrada de 12 voltios.



Figura 3.1. Bomba centrífuga número 1.

Bomba número 2.

Bomba centrífuga modelo 3225BC.25, impulsor tipo cerrado de bronce, con diámetro de succión 1 ¼ " y descarga de 1" y motor eléctrico de corriente continua, marca: Ford SIEMENS, modelo: FTS1006Q, con dos opciones de velocidad y voltaje nominal de entrada de 12 voltios

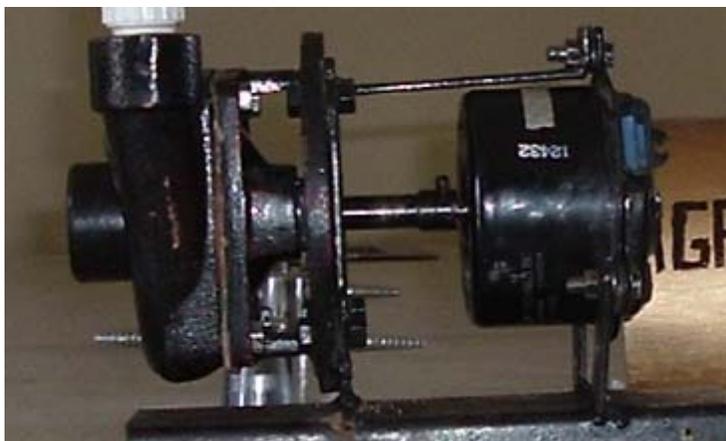


Figura 3.2. Bomba centrífuga número 2.

Equipamiento y Disposición de las bombas centrífugas

En ambas bombas centrífugas evaluadas la disposición de los instrumentos de prueba fue la siguiente:

A la salida de cada bomba centrífuga se colocó una válvula globo para ahorcar el flujo y en seguida un manómetro, mientras que en la tubería de succión en lo más cercano posible de la entrada de bomba se instaló un vacuómetro. Cabe mencionar que se utilizó tubería de PVC tanto en la descarga y en la succión de $\frac{3}{4}$ " y 1 " de diámetro respectivamente (Figura 3.3).

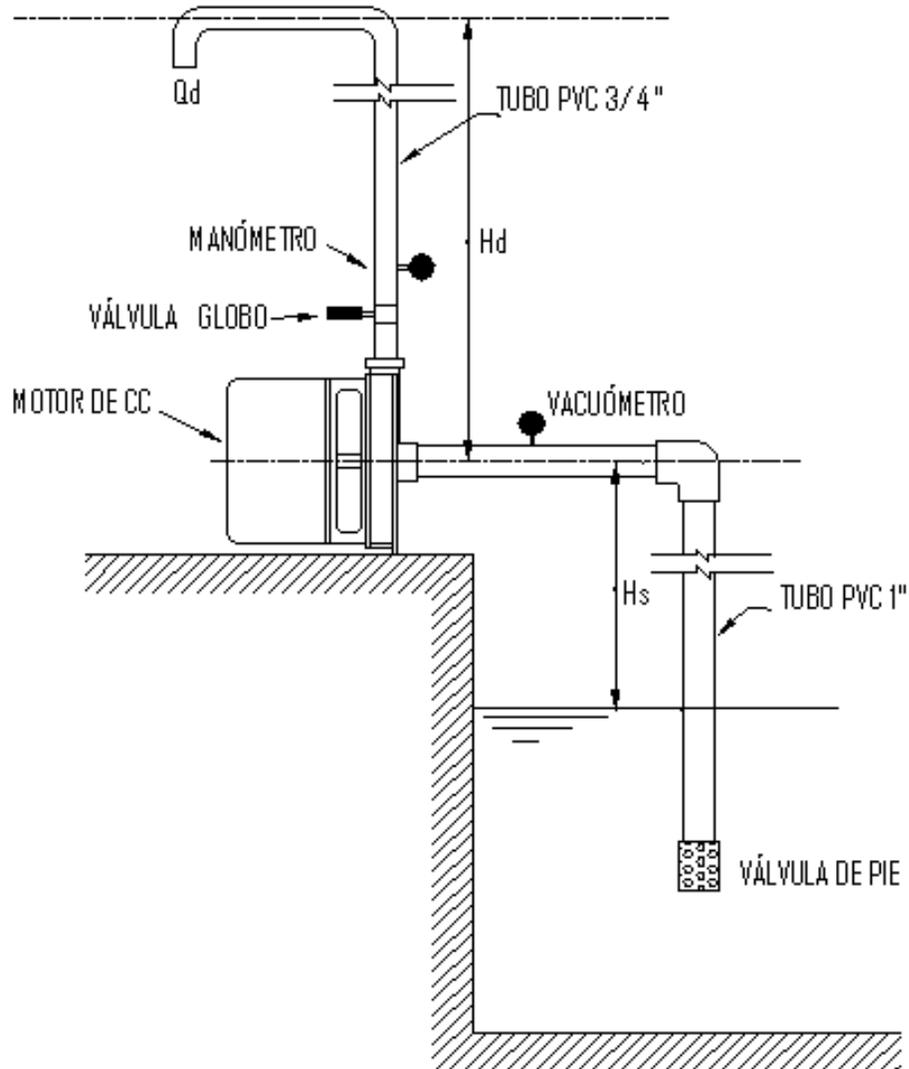


Figura 3.3. Instalación del experimental dela bomba centrífuga evaluada.

METODOLOGÍA

Las pruebas se realizaron con mayor frecuencia en los días de mayor insolación debido a que el motor eléctrico bomba centrífuga funcionaba con energía fotovoltaica suministrada por dos paneles solares, los cuales contaban con una potencia nominal de 50 W cada uno. Se empleó un arreglo fotovoltaico del cual fluía la corriente eléctrica hacia el controlador de carga y de éste hacia los dos acumuladores. Cabe destacar que la conexión eléctrica en paralelo que

se hizo tanto en los acumuladores como en los paneles solares, fue con la finalidad de incrementar el suministro de amperaje y mantener el voltaje a 12 voltios. (Figura. 3.4).

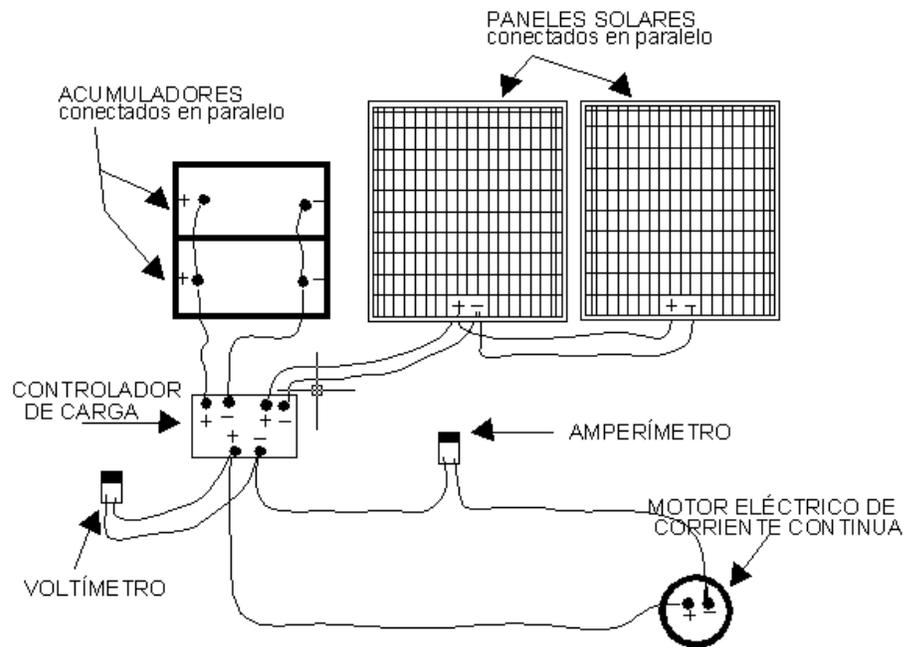


Figura 3.4 Diagrama de la instalación eléctrica del experimento.

En los ensayos de bombeo se realizó lo siguiente:

Determinar la potencia eléctrica consumida por el motor de CC (debido a que este dato no lo proporciona el fabricante), para cada gasto y carga de la bomba centrífuga, mediante la medición del voltaje y del amperaje.

Para la medición del amperaje consumido, se empleó un multímetro digital como amperímetro conectándolo en serie en una de las dos líneas que iba del controlador al motor. Mientras que para medir el voltaje del sistema, cada una de las dos terminales del voltímetro (positivo y negativo), se mantenían fijas al polo de su respectivo signo en el acumulador.

Medir el gasto en la tubería de descarga de una bomba centrífuga a diferentes presiones registradas en el manómetro (PSI), manteniendo constante

la altura de la tubería de succión. Para gastos pequeños se efectuó con la ayuda de una probeta graduada en un litro y para gastos grandes con un recipiente de 20 litros, además de la utilización de un cronómetro para medir el tiempo de descarga unidad de volumen. Se hicieron tres repeticiones en cada una de las presiones establecidas.

Tomar la lectura registrada en el vacuómetro (Feet o pies de columna de agua) para cada gasto y presión generada por la bomba centrífuga. En las dos bombas centrífugas se mantuvo una altura de 40 cm de la superficie del agua a la línea de centro de la bomba.

Determinar con el tacómetro las revoluciones del impulsor de la bomba centrífuga para proporcionar un gasto con la presión marcada en el manómetro.

Procesamiento de datos y ecuaciones utilizadas.

Con la información obtenida se procedió a calcular para cada bomba centrífuga, la potencia eléctrica consumida, el gasto o caudal, la potencia hidráulica desarrollada por la bomba y la eficiencia de operación del sistema. En cada prueba se hicieron tres repeticiones para poder obtener un valor promedio.

Cabe resaltar que la carga considerada en este experimento fue la lectura registrada en el manómetro (PSI), pero se hizo la conversión a metros de columna de agua.

Gasto o caudal

$$Q = \frac{V}{t} = \dots(en , lps) \quad (Ec. 11)$$

$$\bar{Q} = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n}$$

Donde :

Q = gasto, en litros por segundo.

V = volumen, en litros.

t = tiempo, en segundos.

Potencia hidráulica

$$Ph = \frac{Q * Hd}{76} = (en , Hp)... \acute{o}$$

$$Ph = (Q * Hd * 8.92) = (en , Watts)$$
(Ec. 12)

Donde:

Q = gasto, en litros por segundo.

Hd = carga de descarga, en metros de columna de agua.

Potencia eléctrica

Se determinó usando la ecuación número 8.

$$Pe = I * V = ... (en , Watts)$$

Donde:

I = corriente, en amperios.

V = voltaje, en voltios.

Eficiencia

$$n = \frac{Ph}{Pe} = ... (en , \%)$$
(Ec. 13)

Donde:

Ph = potencia hidráulica, en Watts.

Pe = potencia eléctrica, en Watts.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los siguientes cuadros se encuentran tabulados los datos tomados durante las pruebas realizadas con las bombas centrífugas 1.

Cuadro 4.1. Datos experimentales de la bomba centrífuga número 1.

Repetición	Manómetro PSI	Vacuómetro Ft	Voltaje Volts	Corriente Amperes	Volumen Litro	Tiempo Seg	RPM
1	7	0	13	6.59	0		1870
2	7	0	13	6.58	0		1870
3	7	0	13	6.55	0		1870
1	6	1	13	6.85	1	8.11	1844
2	6	1	13	6.85	1	8.08	1844
3	6	1	13	6.85	1	8.09	1844
1	5	2	13	7.57	1	3	1806
2	5	2	13	7.58	1	2.91	1806
3	5	2	13	7.55	1	2.96	1806
1	4	3	13	7.95	1	1.84	1775
2	4	3	13	8	1	1.85	1775
3	4	3	13	7.98	1	1.84	1775
1	3	4	13	8.29	1	1.34	1767
2	3	4	13	8.27	1	1.36	1767
3	3	4	13	8.27	1	1.45	1767
1	0	6	13	8.7	1	1.09	1753
2	0	6	13	8.69	1	1	1753
3	0	6	13	8.67	1	1.04	1753

Cuadro 4.2. Datos experimentales de la bomba centrífuga número 2 operando con velocidad baja.

Repetición	Manómetro PSI	Vacuómetro Ft	Voltaje Volts	Corriente Ampers	RPM	Volumen Litro	Tiempo Seg
1	11	0	12	18.75	2400		0
2	11	0	12	18.75	2400		0
3	11	0	12	18.75	2400		0
1	10	1	12	18.75	2383	1	6.11
2	10	1	12	18.75	2383	1	6.04
3	10	1	12	18.75	2383	1	5.90
1	9	2	12	20	2337	1	4.11
2	9	2	12	20	2337	1	3.94
3	9	2	12	20	2337	1	4.06
1	8	3	12	20	2321	1	2.23
2	8	3	12	20	2321	1	2.08
3	8	3	12	20	2321	1	2.11
1	7	4	12	21	2304	1	1.66
2	7	4	12	21	2304	1	1.74
3	7	4	12	21	2304	1	1.76
1	6	5	12	21	2276	1	1.41
2	6	5	12	21	2276	1	1.42
3	6	5	12	21	2276	1	1.47
1	5	6	12	22	2259	1	1.26
2	5	6	12	22	2259	1	1.30
3	5	6	12	22	2259	1	1.33
1	4	7	12	22	2248	1	1.19
2	4	7	12	22	2248	1	1.16
3	4	7	12	22	2248	1	1.14
1	3	8	12	22.5	2236	1	1.12
2	3	8	12	22.5	2236	1	1.11
3	3	8	12	22.5	2236	1	1.08
1	0	10	12	22.5	2228	1	0.97
2	0	10	12	22.5	2228	1	0.90
3	0	10	12	22.5	2228	1	0.97

Cuadro 4.3 Datos experimentales de la bomba centrífuga número 2 operando con velocidad alta.

Repetición	Manómetro PSI	Vacuómetro Ft	Voltaje Volts	Corriente Amperes	Volumen Litro	Tiempo Seg	RPM
1	0	14.5	12	56.25	20	17.87	2890
2	0	14.5	12	56.25	20	18.18	2890
3	0	14.5	12	56.25	20	19.41	2890
1	5	12	12	56.25	20	22.8	2885
2	5	12	12	56.25	20	22.67	2885
3	5	12	12	56.25	20	21.96	2885
1	10	4	12	52.5	20	41.38	2880
2	10	4	12	52.5	20	42.1	2880
3	10	4	12	52.5	20	43.25	2880
1	15	1	12	47.5	1	3.79	2875
2	15	1	12	47.5	1	3.81	2875
3	15	1	12	47.5	1	3.77	2875
1	18	1	12	45	1	13.98	2863
2	18	1	12	45	1	13.65	2863
3	18	1	12	45	1	13.87	2863
1	19	0	12	45	0	0	2854
2	19	0	12	45	0	0	2854
3	19	0	12	45	0	0	2854

A continuación se presentan los resultados de las siguientes variables obtenidos con el procesamiento de los datos experimentales que se tomaron en las pruebas realizadas a las bombas centrífugas de energía solar:

Q = Gasto o capacidad de descarga, Litros por minuto (LPM).

Hd = Carga de descarga registrado en el manómetro en metros de columna de agua (mca).

Pe = Potencia eléctrica, en Watts (W) y en caballos de fuerza (Hp).

Ph = Potencia hidráulica, en Watts (W) y en caballos de fuerza (Hp)

RPM = Rotación del impulsor de la bomba, en revoluciones por minuto.

Hs = Carga de succión registrado en el vacuómetro, en mca.

n = Eficiencia del sistema motor-bomba, en %.

Bomba número 1.

Valores de los parámetros de la bomba centrífuga con motor de corriente directa de una sola velocidad

Cuadro 4.4. Resultados de la bomba número 1

No.	RPM	Hd	Hs	Q	Q	Ph	Ph	Pe	Pe	n
Prueba		mca	mca	LPS	LPM	Hp	W	W	Hp	%
1	1870	4.92	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	85.67	0.11	0.00
2	1870	4.92	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	85.54	0.11	0.00
3	1870	4.92	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	85.15	0.11	0.00
ξ	1870	4.92	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	85.45	0.11	0.00
1	1844	4.22	0.30	0.12	7.40	0.01	5.11	89.05	0.12	5.73
2	1844	4.22	0.30	0.12	7.43	0.01	5.13	89.05	0.12	5.76
3	1844	4.22	0.30	0.12	7.42	0.01	5.12	89.05	0.12	5.75
ξ	1844	4.22	0.30	0.12	7.41	0.01	5.12	89.05	0.12	5.75
1	1806	3.52	0.61	0.33	20.00	0.02	11.50	98.41	0.13	11.69
2	1806	3.52	0.61	0.34	20.62	0.02	11.86	98.54	0.13	12.04
3	1806	3.52	0.61	0.34	20.27	0.02	11.66	98.15	0.13	11.88
ξ	1806	3.52	0.61	0.34	20.30	0.02	11.68	98.37	0.13	11.87
1	1775	2.81	0.91	0.54	32.61	0.02	15.01	103.35	0.14	14.52
2	1775	2.81	0.91	0.54	32.43	0.02	14.92	104.00	0.14	14.35
3	1775	2.81	0.91	0.54	32.61	0.02	15.01	103.74	0.14	14.47
ξ	1775	2.81	0.91	0.54	32.55	0.02	14.98	103.70	0.14	14.45
1	1767	2.11	1.22	0.75	44.78	0.02	15.45	107.77	0.14	14.34
2	1767	2.11	1.22	0.74	44.12	0.02	15.23	107.51	0.14	14.16
3	1767	2.11	1.22	0.69	41.38	0.02	14.28	107.51	0.14	13.28
ξ	1767	2.11	1.22	0.72	43.42	0.02	14.99	107.60	0.14	13.93
1	1753	0.00	1.83	0.92	55.05	0.00	0.00	113.10	0.15	0.00
2	1753	0.00	1.83	1.00	60.00	0.00	0.00	112.97	0.15	0.00
3	1753	0.00	1.83	0.96	57.69	0.00	0.00	112.71	0.15	0.00
ξ	1753	0.00	1.83	0.96	57.58	0.00	0.00	112.93	0.15	0.00

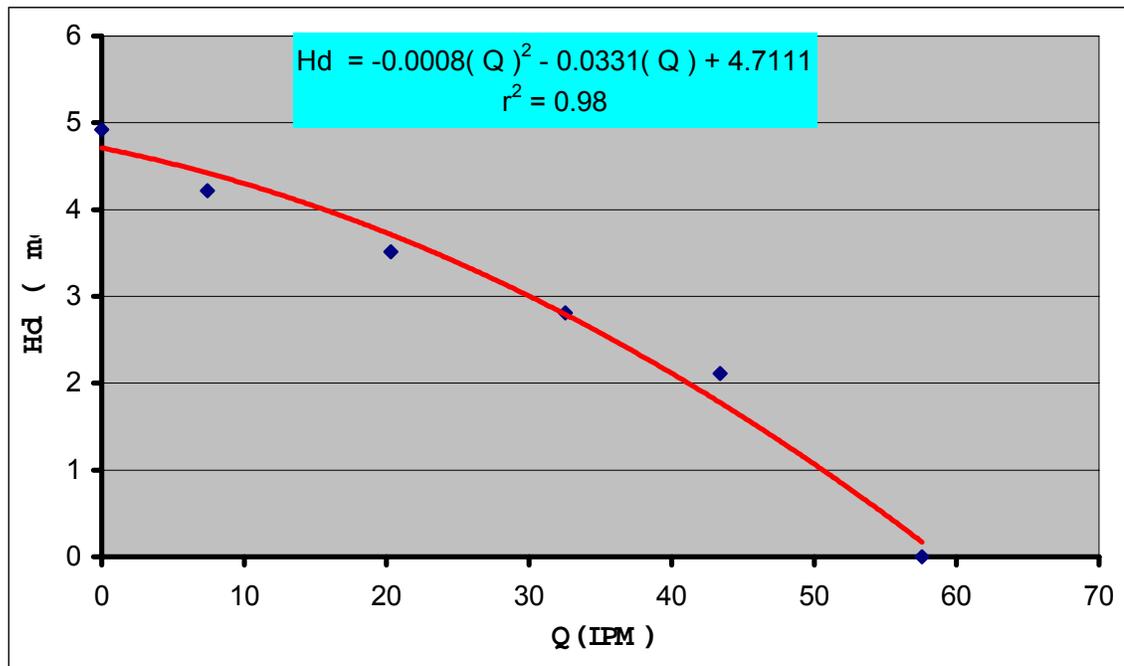


Figura 4.1.1 Curva característica de Carga de descarga (Hd) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

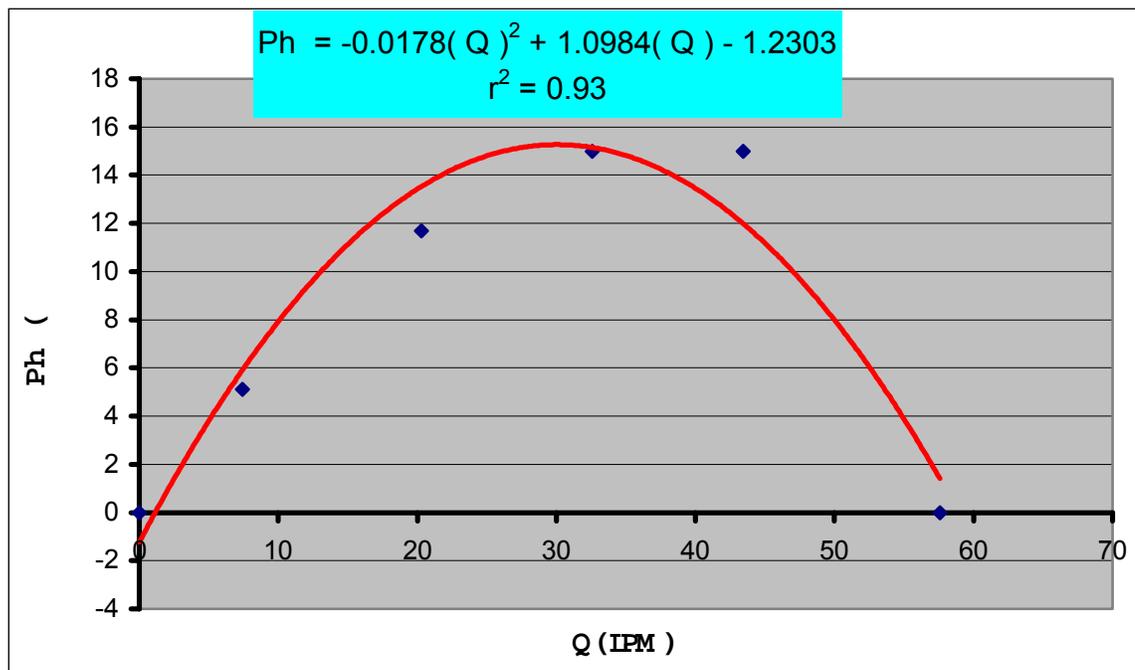


Figura 4.1.2 . Curva característica de Potencia hidráulica (Ph) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

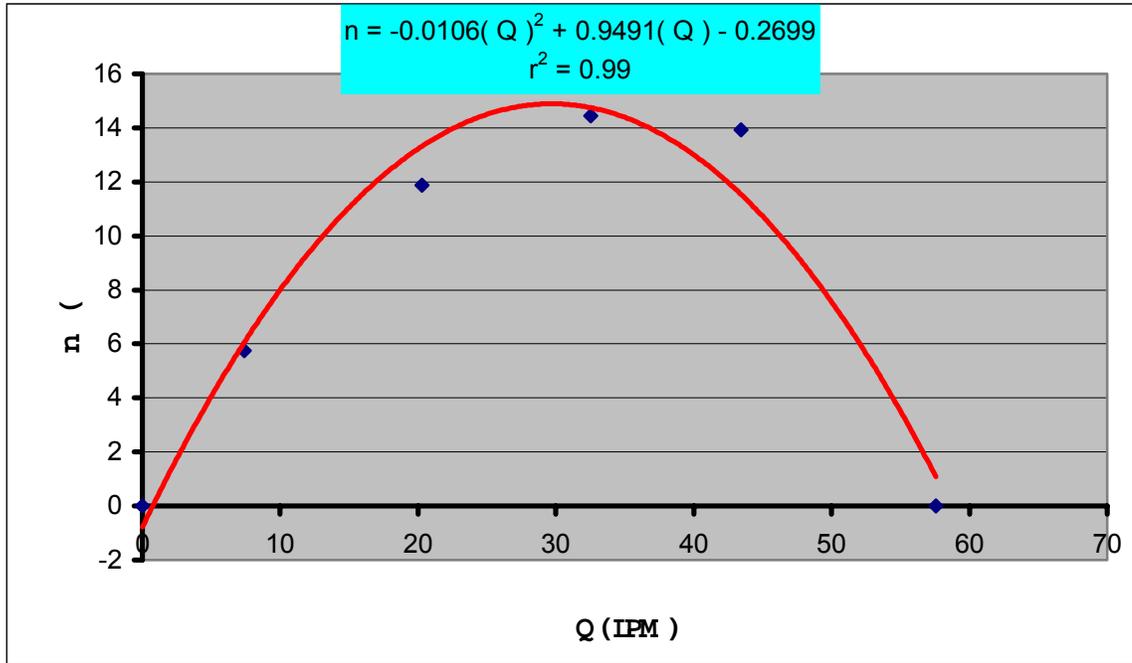


Figura 4.1.3. Curva característica de Eficiencia (n) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

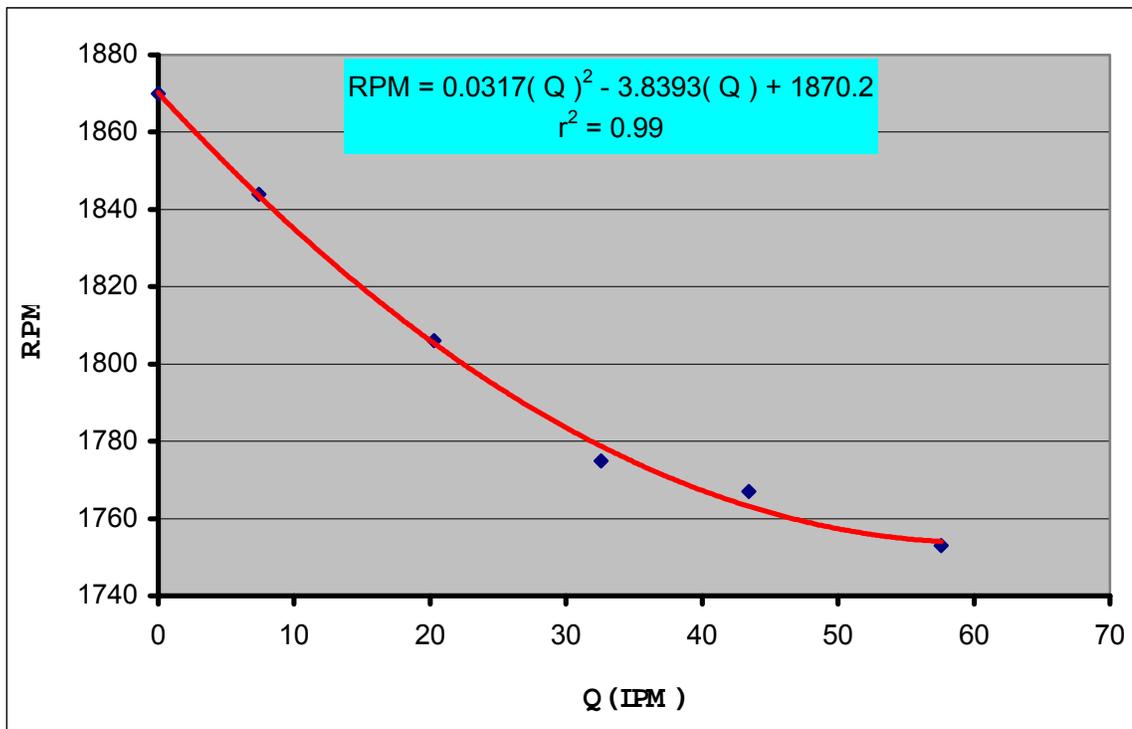


Figura 4.1.4. Curva característica de las Revoluciones por minuto (RPM) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

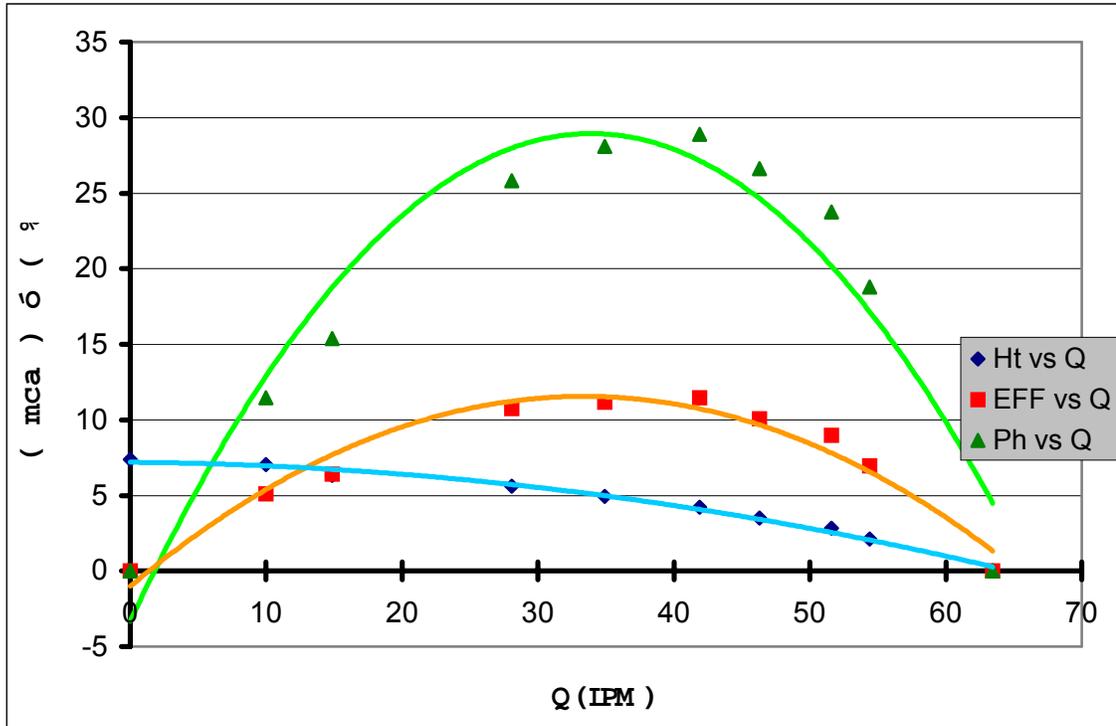


Figura 4.1.5 Curvas características de la bomba número 1; cuando $h_s = 0.40$ m.

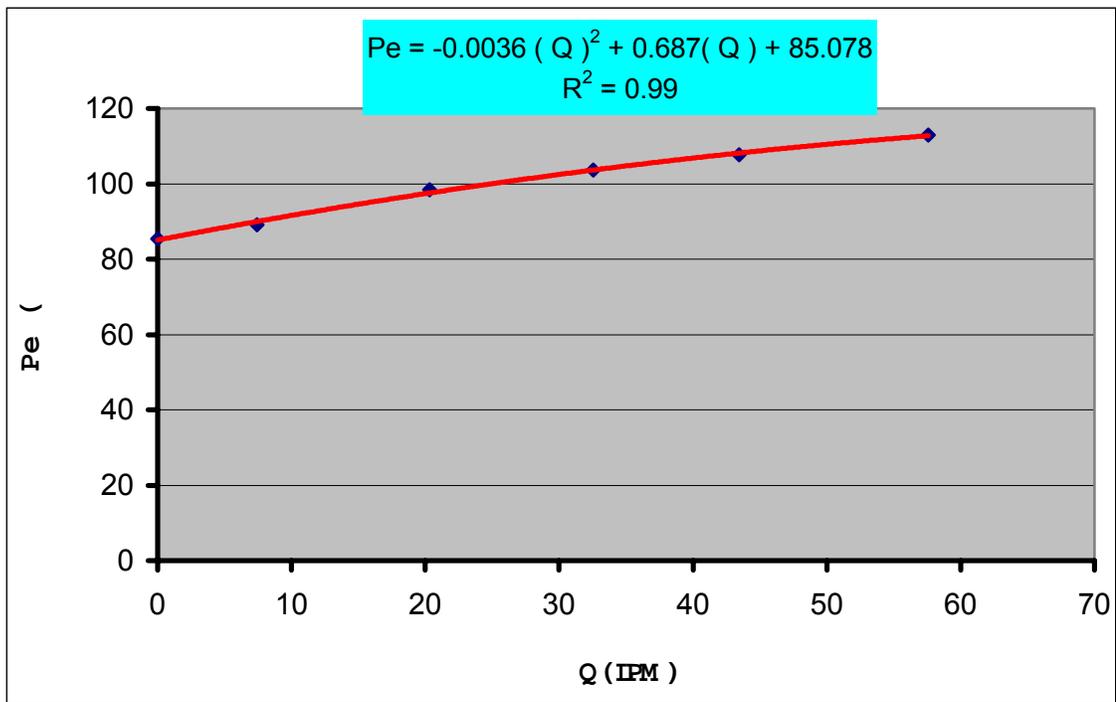


Figura 4.1.6. Curva característica de Potencia eléctrica (Pe) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

Bomba N° 1

Relación Hd vs Q

En el cuadro 4.1 se encuentra tabulado el máximo gasto desarrollado por esta bomba que fue de 57.58 LPM, valor que se alcanzó cuando la carga de descarga registrada en el manómetro fue igual cero, en cambio, el máximo valor de la carga que generó la bomba fue de 4.92 metros, cuando el caudal fue de cero LPM. La ecuación de regresión de mayor ajuste a la relación de Hd vs Q, fue la siguiente siguiente: $Hd = - 0.0002 Q^2 - 0.0351 Q + 5.028$, la cual presentó un coeficiente de determinación del 98 % (Figura 4.1.1)

Relación Ph vs Q

En la gráfica se observa que la potencia hidráulica aumentó proporcionalmente desde cero W hasta llegar a un nivel máximo de 14.99 , y a partir de este valor empezó a disminuir hasta llegar nuevamente a cero. La ecuación de regresión de mejor ajuste a esta relación es la siguiente: $Ph = -0.0097 Q^2 + 0.9476 Q - 0.6085$, con un coeficiente de determinación de 93 % (Figura 4.1.2)

Relación n vs Q

En la gráfica que ilustra esta relación (Figura 4.1.3) y en el cuadro 4.1 se observa que la máxima eficiencia alcanzada por esta bomba fue de 14.95 %, cuando la bomba desarrolló un gasto de 32.55 LPM y una carga de descarga de 2.81 metros de columna de agua.

Relación RPM vs Q

El máximo valor de revoluciones por minuto que operó esta bomba centrífuga fue de 1870, cuando se registró la máxima carga en el manómetro o sea cuando el valor del gasto fue cero. Al igual que las demás relaciones la ecuación polinomial de segundo grado fue la de mayor ajuste a esta relación:

RPM = 0.0317 Q² – 3.8393 Q + 1870.2, con un coeficiente de determinación de 99% (Figura 4.1.4).

Resultados obtenidos con las ecuaciones de la leyes de afinidad para la bomba número 1.

Como se puede observar en la gráfica en donde se sobreponen las tres curvas características: Hd vs Q, Ph vs Q y n vs Q de esta bomba centrífuga (figura 4.1.5), y además apoyándose en las ecuaciones de cada una de ellas, el punto de máxima eficiencia (14.86 %) se alcanza cuando se tiene un gasto de 30 LPM , una carga de descarga 3.7 metros de columna de agua, una potencia hidráulica de 15.25 Watts.

Con el valor calculado con la ecuación de la curva característica de las revoluciones por minuto contra gasto, que fue de 1 784 RPM en el punto de máxima eficiencia, se procedió a calcular los valores de Hd, Q y Ph con las ecuaciones de afinidad que rigen el funcionamiento de las bombas centrífugas, cuando la velocidad del impulsor (RPM) cambia:

$$Q = Q_1 \left(n / n_1 \right)$$

$$H = H_1 \left(n / n_1 \right)^2$$

$$P = P_1 \left(n / n_1 \right)^3$$

ó

$$\frac{n}{n_1} = \frac{Q}{Q_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{P}{P_1}}$$

En las cuales:

n = nueva velocidad deseada, en rpm.

Q = capacidad, en litros por minuto a la velocidad deseada n.

H = carga, en metros a la velocidad deseada n para la capacidad Q.

P = caballos de fuerza a la velocidad deseada n con H y Q .

n_1 = una velocidad, en RPM cuyas características se conocen.

Q_1 = una capacidad, a la velocidad n_1 .

H_1 = carga, a la capacidad Q_1 a la velocidad n_1 .

P_1 = caballos de fuerza al freno a la velocidad n_1 con H_1 y Q_1 .

Considerando los datos del proporcionados por el fabricante de la bomba centrífuga:

$n_1 = 3\,450$ RPM.

$Q_1 = 60$ LPM

$H_1 = 13.5$ mca.

$P_1 = 0.18$ Hp ó 132.5 Watts.

Entonces:

$$Q = 60 * \left(\frac{1784}{3450} \right) = 31.0 \text{ .. LPM}$$

$$H = 13.5 * \left(\frac{1784}{3450} \right)^2 = 3.6 \text{ .. mca}$$

$$P = 132.5 * \left(\frac{1784}{3450} \right)^3 = 18.3 \text{ .. Watts}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos con las ecuaciones de las curvas características en el punto de máxima eficiencia de la bomba número 1.

Cuadro 4.5. Valores de las variables en punto de máxima eficiencia de la bomba número 1.

RPM	Hd mca	Q LPM	Ph W	Pe W	n %
1 784	3.7	30	15.25	102.45	14.86

En esta comparación se tiene una gran similitud entre los resultados de cada variable, aunque el valor de la potencia hidráulica calculado con las ecuaciones de afinidad es mayor que el valor obtenido con las ecuaciones de la curva característica de la potencia hidráulica vs gasto. Una posible razón de esta discrepancia es que la bomba centrífuga utilizada esta diseñada para trabajar con un motor de 0.25 Hp, mientras que el motor de corriente continua que se le acopló apenas tiene una potencia de 0.15 Hp.

Bomba N° 2.

Cuadro 4.6 Resultados de la bomba centrífuga con la velocidad baja del motor.

No. Pruebas	RPM	Hd	Hs	Qd	Qd	Ph	Ph	Pe	Pe	n
		mca	mca	LPS	LPM	W	Hp	Hp	W	%
1	2400	7.38	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	225.00	0.00
2	2400	7.38	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	225.00	0.00
3	2400	7.38	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	225.00	0.00
ξ	2400	7.38	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	225.00	0.00
1	2383	7.03	0.30	0.16	9.82	11.30	0.02	0.30	225.00	5.02
2	2383	7.03	0.30	0.17	9.93	11.43	0.02	0.30	225.00	5.08
3	2383	7.03	0.30	0.17	10.17	11.70	0.02	0.30	225.00	5.20
ξ	2383	7.03	0.30	0.17	9.97	11.48	0.02	0.30	225.00	5.10
1	2337	6.33	0.61	0.24	14.60	15.12	0.02	0.32	240.00	6.30
2	2337	6.33	0.61	0.25	15.23	15.77	0.02	0.32	240.00	6.57
3	2337	6.33	0.61	0.25	14.78	15.30	0.02	0.32	240.00	6.38
ξ	2337	6.33	0.61	0.25	14.87	15.40	0.02	0.32	240.00	6.41
1	2321	5.63	0.91	0.45	26.91	24.76	0.03	0.32	240.00	10.32
2	2321	5.63	0.91	0.48	28.85	26.55	0.04	0.32	240.00	11.06
3	2321	5.63	0.91	0.47	28.44	26.17	0.04	0.32	240.00	10.90
ξ	2321	5.63	0.91	0.47	28.06	25.83	0.03	0.32	240.00	10.76
1	2304	4.92	1.22	0.60	36.14	29.11	0.04	0.34	252.00	11.55
2	2304	4.92	1.22	0.57	34.48	27.77	0.04	0.34	252.00	11.02
3	2304	4.92	1.22	0.57	34.09	27.45	0.04	0.34	252.00	10.89
ξ	2304	4.92	1.22	0.58	34.91	28.11	0.04	0.34	252.00	11.16

Cuadro 4.6 Resultados obtenidos de las bombas centrífugas con la velocidad baja del motor.

No.	RPM	Hd	Hs	Qd	Qd	Ph	Ph	Pe	Pe	n
Pruebas		mca	mca	LPS	LPM	W	Hp	Hp	W	%
1	2276	4.22	1.52	0.71	42.55	29.37	0.04	0.34	252.00	11.66
2	2276	4.22	1.52	0.70	42.25	29.17	0.04	0.34	252.00	11.57
3	2276	4.22	1.52	0.68	40.82	28.17	0.04	0.34	252.00	11.18
ξ	2276	4.22	1.52	0.70	41.87	28.91	0.04	0.34	252.00	11.47
1	2259	3.52	1.83	0.79	47.62	27.39	0.04	0.35	264.00	10.38
2	2259	3.52	1.83	0.77	46.15	26.55	0.04	0.35	264.00	10.06
3	2259	3.52	1.83	0.75	45.11	25.95	0.03	0.35	264.00	9.83
ξ	2259	3.52	1.83	0.77	46.30	26.63	0.04	0.35	264.00	10.09
1	2248	2.81	2.13	0.84	50.42	23.20	0.03	0.35	264.00	8.79
2	2248	2.81	2.13	0.86	51.72	23.80	0.03	0.35	264.00	9.02
3	2248	2.81	2.13	0.88	52.63	24.22	0.03	0.35	264.00	9.17
ξ	2248	2.81	2.13	0.86	51.59	23.74	0.03	0.35	264.00	8.99
1	2236	2.11	2.44	0.89	53.57	18.49	0.02	0.36	270.00	6.85
2	2236	2.11	2.44	0.90	54.05	18.66	0.03	0.36	270.00	6.91
3	2236	2.11	2.44	0.93	55.56	19.17	0.03	0.36	270.00	7.10
ξ	2236	2.11	2.44	0.91	54.39	18.77	0.03	0.36	270.00	6.95
1	2228	0.00	3.05	1.03	61.86	0.00	0.00	0.36	270.00	0.00
2	2228	0.00	3.05	1.11	66.67	0.00	0.00	0.36	270.00	0.00
3	2228	0.00	3.05	1.03	61.86	0.00	0.00	0.36	270.00	0.00
ξ	2228	0.00	3.05	1.06	63.46	0.00	0.00	0.36	270.00	0.00

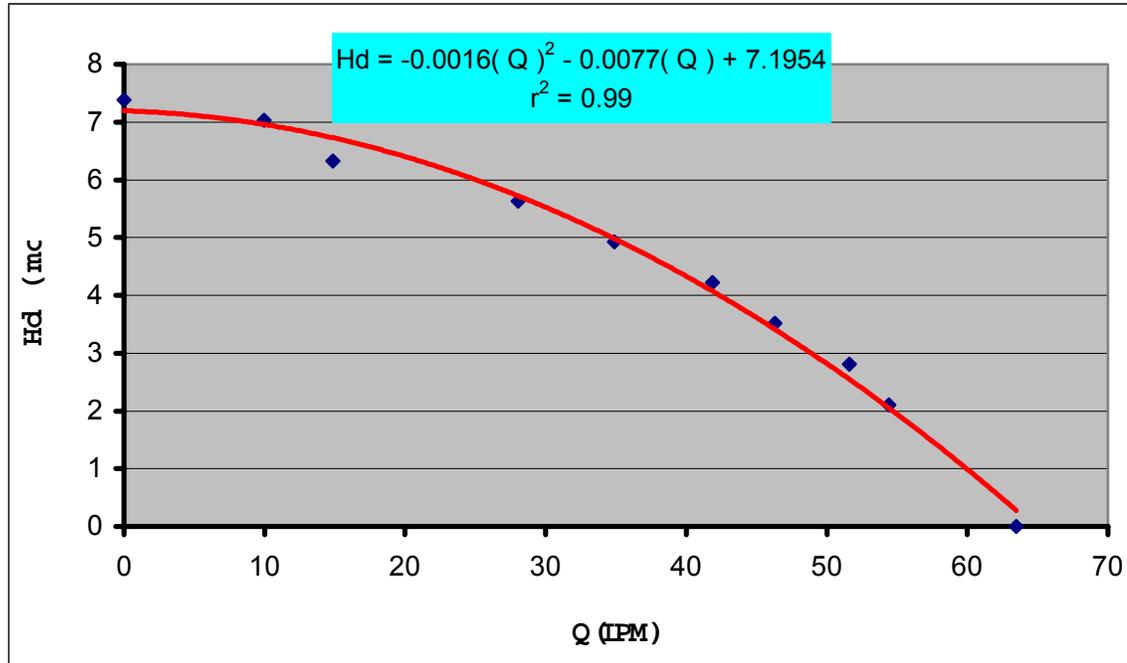


Figura 4.2.1 Curva característica de Carga de descarga (Hd) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

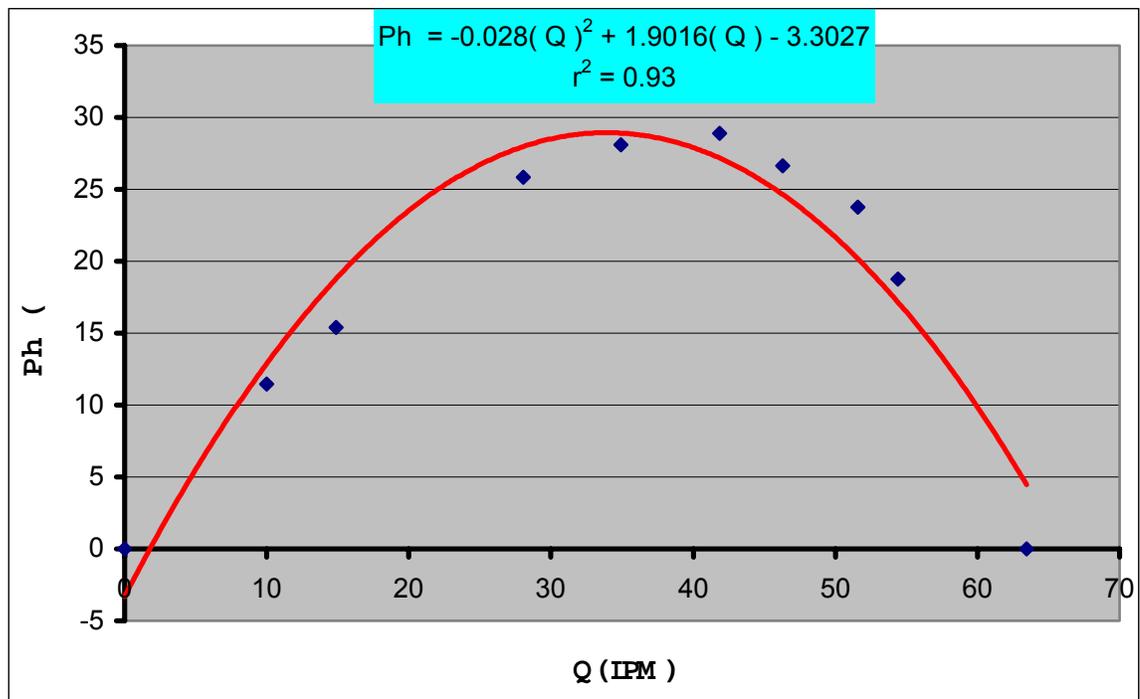


Figura 4.2.2 Curva característica de Potencia hidráulica (Ph) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

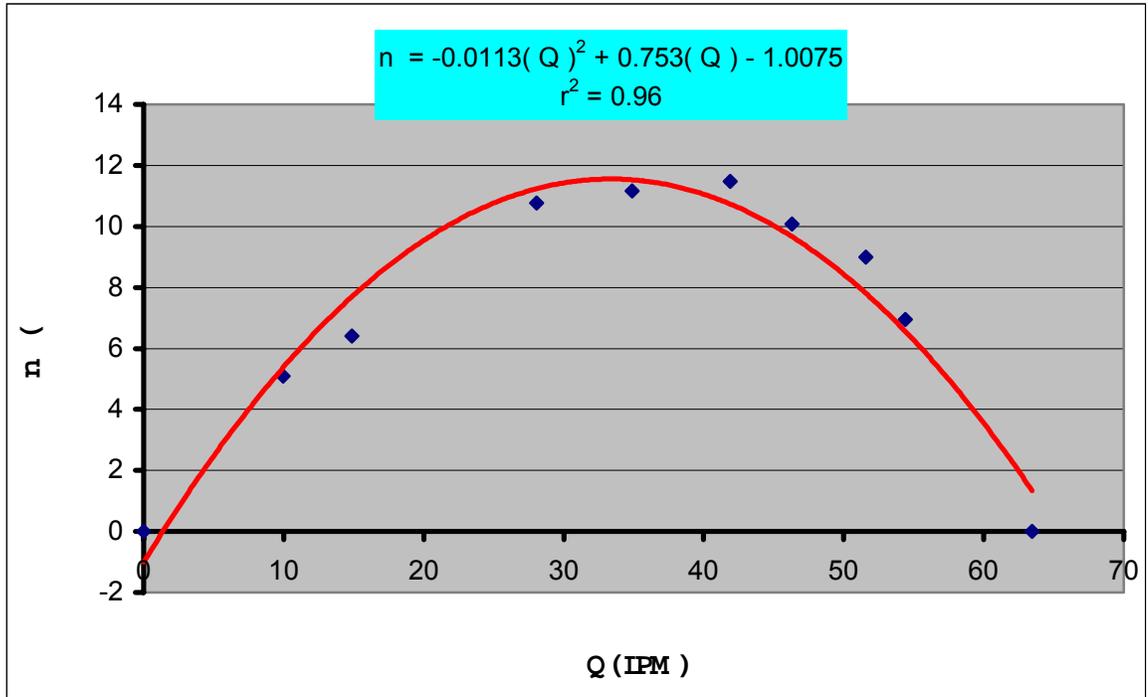


Figura 4.2.3 Curva característica de Eficiencia (n) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

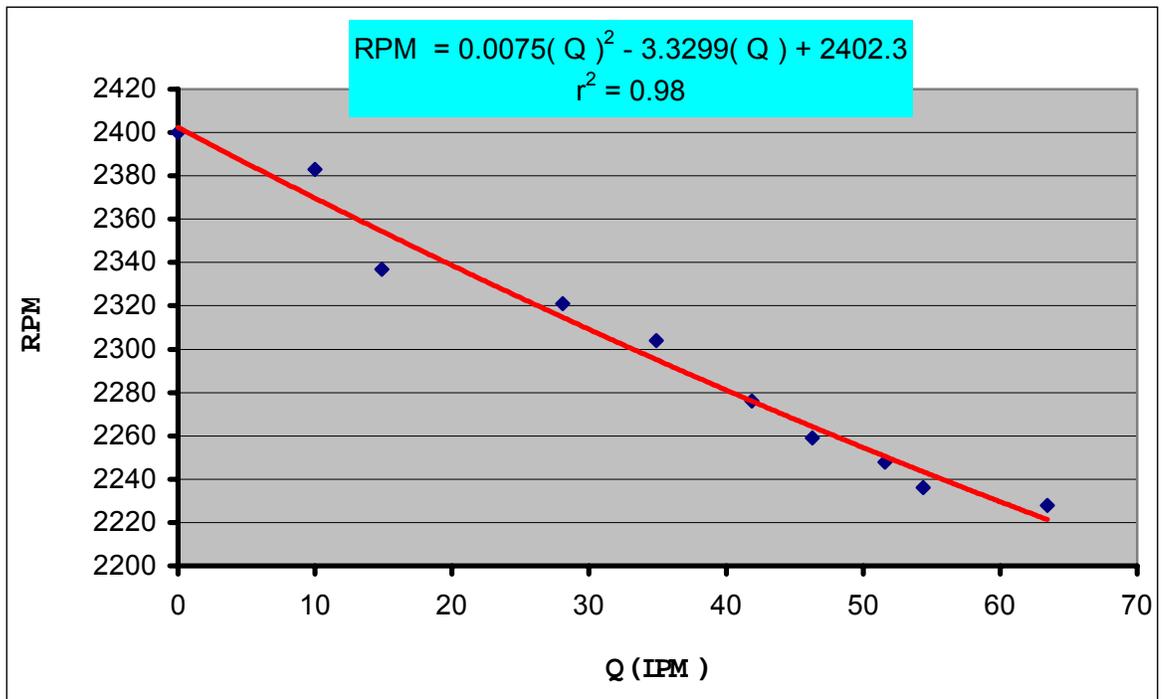


Figura 4.2.4 Curva característica de Revoluciones por minuto (RPM) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

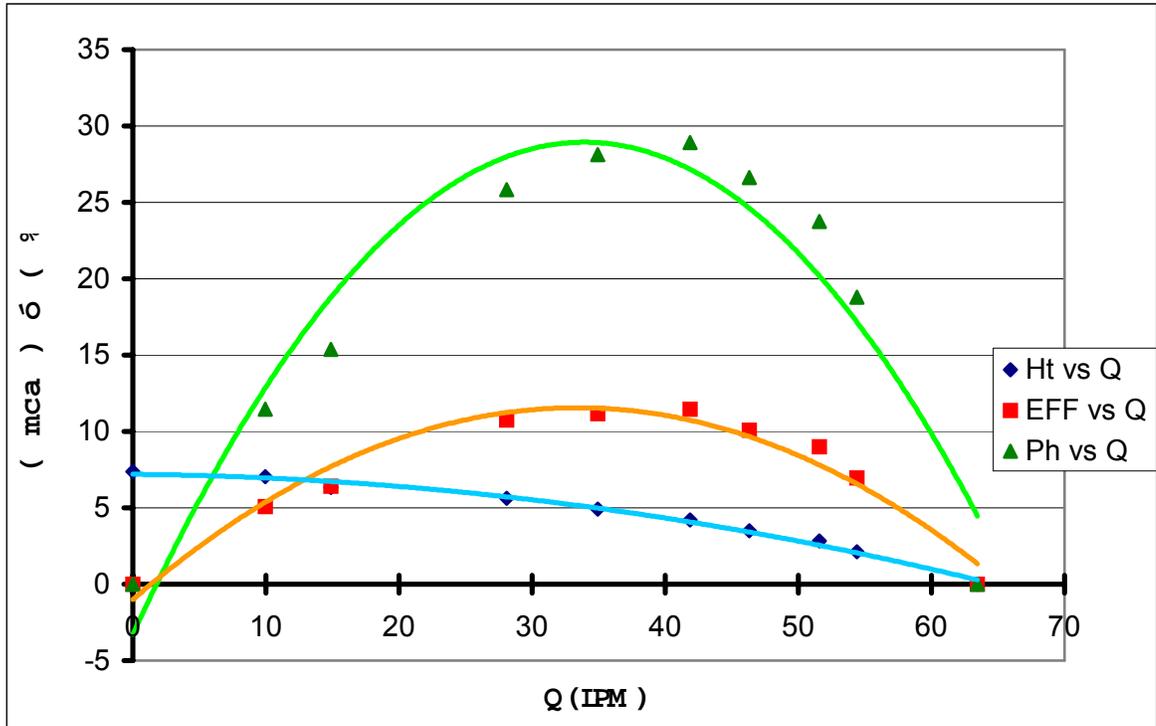


Figura 4.2.5 Curvas características de la bomba número 2 con velocidad baja; cuando $h_s = 0.40$ m.

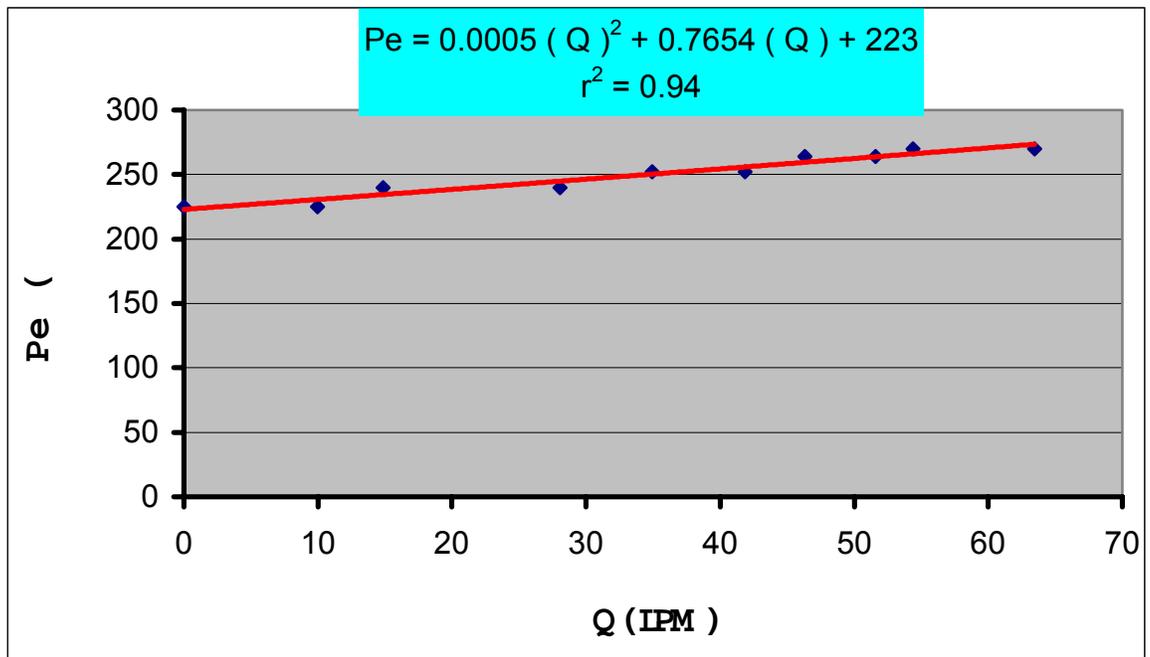


Figura 4.2.6 Curva característica de Potencia eléctrica (Pe) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

Bomba N°2 con velocidad baja del motor.

Relación Hd vs Q

La curva característica obtenida que muestra la relación entre estas dos variables se obtuvo con una ecuación polinomial de segundo grado y con un coeficiente de determinación de $r^2 = 99\%$. Experimentalmente el gasto máximo que descargó esta bomba fue de 63.46 LPM contra una carga de 0 metros de columna de agua. Mientras que el valor más alto de carga que se registró en el manómetro fue de 7.38 mca de agua cuando el gasto fue de 0 LPM (Figura 4.2.1).

Relación Ph vs Q

De la correlación entre la Potencia hidráulica y el gasto de la bomba se obtuvo la siguiente ecuación: $Ph = -0.0154 Q^2 + 1.6006 Q - 1.7217$, con la cual se trazó la curva característica que muestra la relación entre estas dos variables. En la figura 4.2.2 se observa que la potencia hidráulica aumentó proporcionalmente desde cero hasta llegar al un valor máximo que fue de 28.91 W cuando el gasto fue de 41.87 y a partir de este valor empieza a descender por que se incrementa el gasto.

Relación n vs Q

La línea de tendencia que se obtiene al hacer una correlación entre estas dos variables indica que la eficiencia del sistema se incrementa a menudo que el gasto aumenta hasta llegar a su máximo valor, que en este caso fue de e 11.47 % con un gasto de 41.87 LPM y a partir de ese punto, la curva empieza a descender por que el valor del producto entre el gasto y la carga de descarga de decrece paulatinamente mientras que la potencia eléctrica consumida por el motor se incrementa a medida que aumenta el gasto.

Relación RPM vs Q.

Los datos obtenidos de las revoluciones por minuto del impulsor son mayores que las de la bomba número 1, esto es por que la potencia eléctrica consumida por el motor de esta bomba centrífuga es casi el doble de demandada por la primera. En la curva característica obtenida (Figura 4.2.4), se obtuvo la siguiente ecuación de mayor ajuste en la correlación entre estas dos variables: $RPM = 0.0075 Q^2 - 3.3299 Q + 2\ 402.3$, con un coeficiente de determinación del 98 %. También se observa que el comportamiento de la curva característica de esta relación es que: a medida que aumenta el gasto; el máximo valor de las revoluciones por minuto a las que operó esta bomba fue de 2 400 PRM, con un gasto de cero LPM mientras que el mínimo valor fue de 2 228 revoluciones con un gasto máximo de 63.46 litros por minuto.

En la tabla que se muestra a continuación contiene los resultados obtenidos con las ecuaciones de las curvas características en el punto de máxima eficiencia de la bomba número 2 con velocidad baja.

Cuadro 4.7. Valores de las variables en punto de máxima eficiencia de la bomba número 2 con velocidad baja del motor.

RPM	Hd mca	Q LPM	Ph W	Pe W	n %
2 300	5.2	33	28.9	249	11.54

Cuadro 4.8. Valores obtenidos de la bomba número 2 con la velocidad alta del motor.

No.	RPM	Q	Q	Hd	Hs	Ph	Ph	Pe	Pe	n
Prueba		LPM	LPS	mca	mca	W	Hp	W	Hp	%
1	2890	0.00	0.00	13.36	0.30	0.00	0.00	540.00	0.72	0.00
2	2890	0.00	0.00	13.36	0.30	0.00	0.00	540.00	0.72	0.00
3	2890	0.00	0.00	13.36	0.30	0.00	0.00	540.00	0.72	0.00
ξ	2890	0.00	0.00	13.36	0.30	0.00	0.00	540.00	0.72	0.00
1	2885	4.29	0.07	12.66	0.30	8.89	0.01	540.00	0.72	1.65
2	2885	4.40	0.07	12.66	0.30	9.10	0.01	540.00	0.72	1.69
3	2885	4.33	0.07	12.66	0.30	8.96	0.01	540.00	0.72	1.66
ξ	2885	4.34	0.07	12.66	0.30	8.98	0.01	540.00	0.72	1.66
1	2880	15.83	0.26	10.55	0.30	27.32	0.04	570.00	0.76	4.79
2	2880	15.75	0.26	10.55	0.30	27.18	0.04	570.00	0.76	4.77
3	2880	15.92	0.27	10.55	0.30	27.46	0.04	570.00	0.76	4.82
ξ	2880	15.83	0.26	10.55	0.30	27.32	0.04	570.00	0.76	4.79
1	2875	24.59	0.41	9.14	0.61	36.78	0.05	600.00	0.80	6.13
2	2875	26.09	0.43	9.14	0.61	39.02	0.05	600.00	0.80	6.50
3	2875	24.59	0.41	9.14	0.61	36.78	0.05	600.00	0.80	6.13
ξ	2875	25.09	0.42	9.14	0.61	37.52	0.05	600.00	0.80	6.25
1	2867	52.63	0.88	3.52	3.66	30.28	0.04	675.00	0.90	4.49
2	2867	52.93	0.88	3.52	3.66	30.45	0.04	675.00	0.90	4.51
3	2867	54.64	0.91	3.52	3.66	31.43	0.04	675.00	0.90	4.66
ξ	2867	53.40	0.89	3.52	3.66	30.72	0.04	675.00	0.90	4.55
1	2860	67.15	1.12	0.00	4.42	0.00	0.00	675.00	0.90	0.00
2	2860	66.01	1.10	0.00	4.42	0.00	0.00	675.00	0.90	0.00
3	2860	61.82	1.03	0.00	4.42	0.00	0.00	675.00	0.90	0.00
ξ	2860	64.99	1.08	0.00	4.42	0.00	0.00	675.00	0.90	0.00

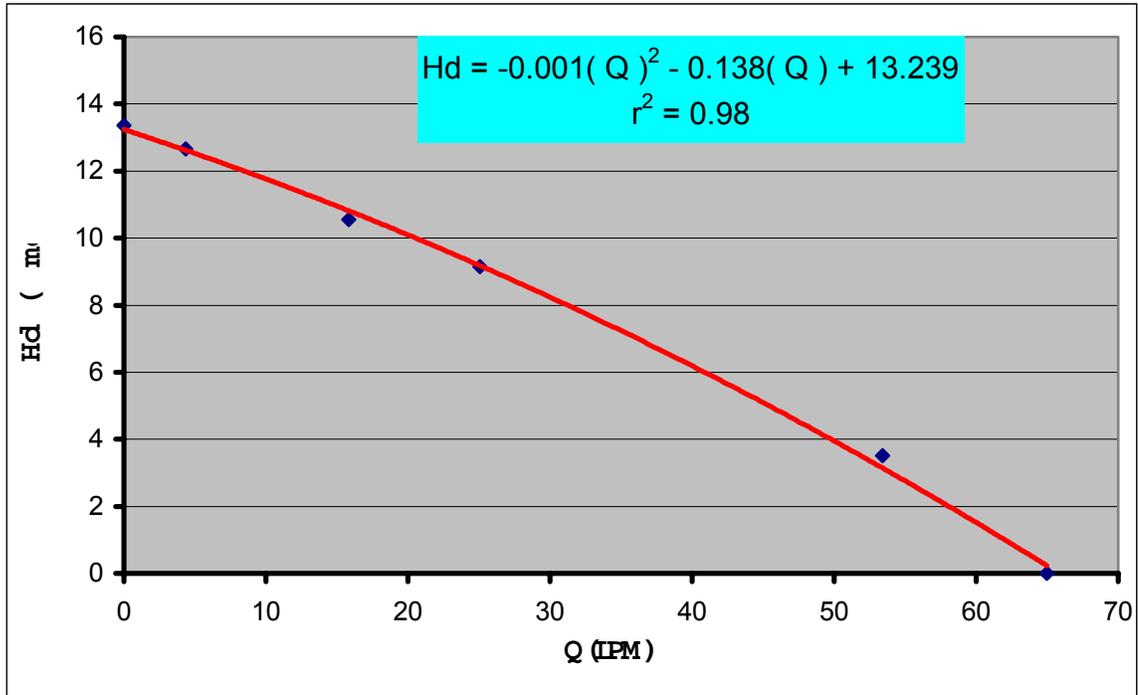


Figura 4.3.1. Curva característica de Carga de descarga (Hd) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

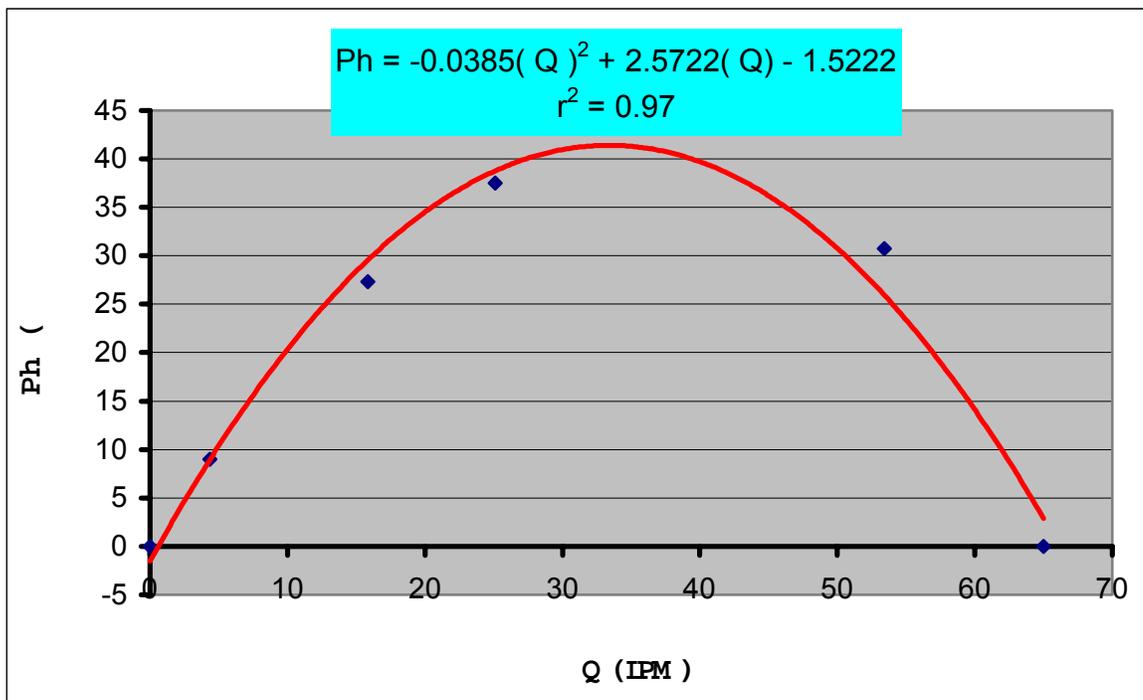


Figura 4.3.2 Curva característica de Potencia hidráulica (Ph) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

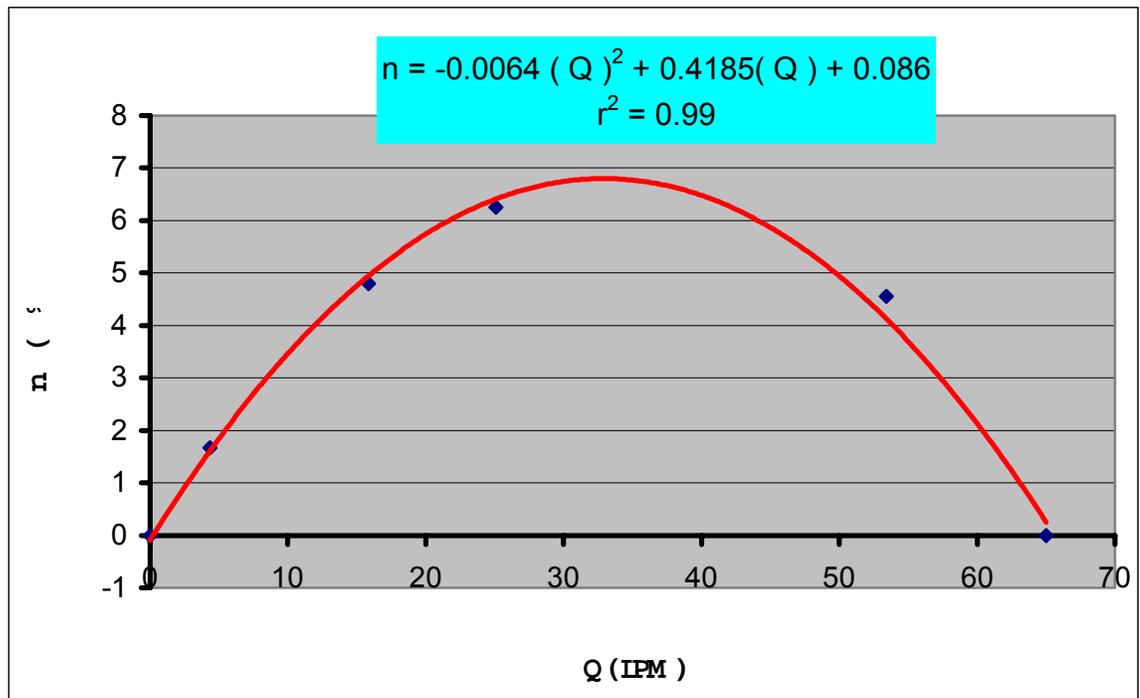


Figura 4.3.3 Curva característica de Eficiencia (n) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

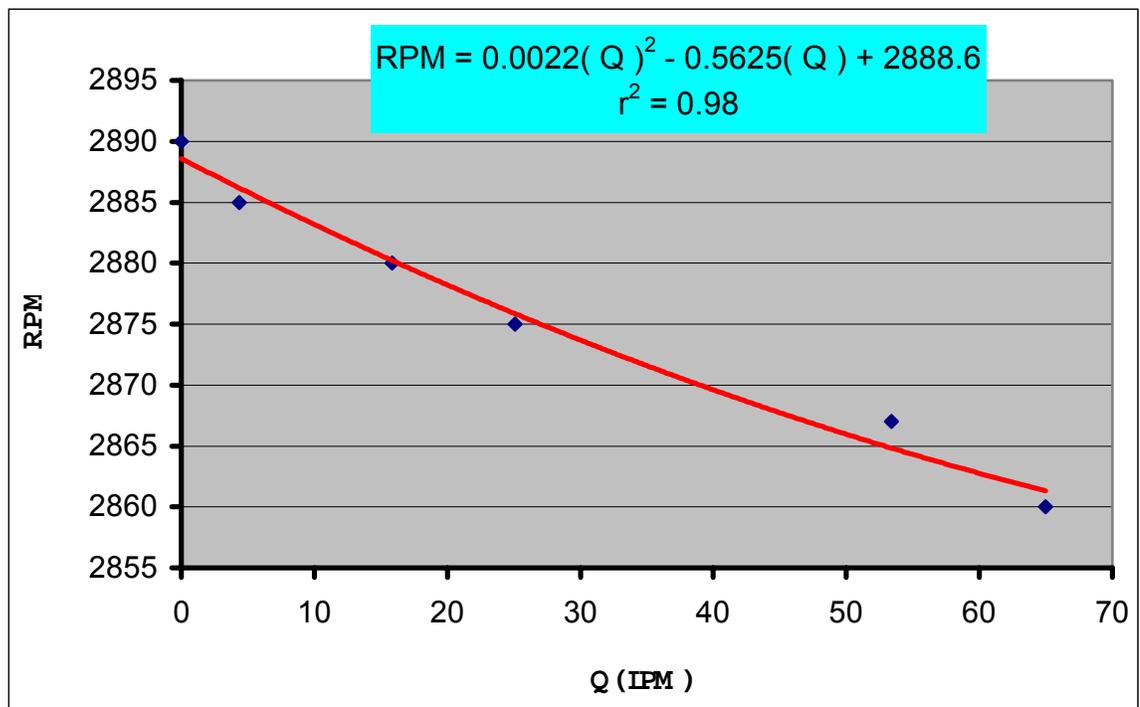


Figura 4.3.4 Curva característica de Revoluciones por minuto (RPM) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

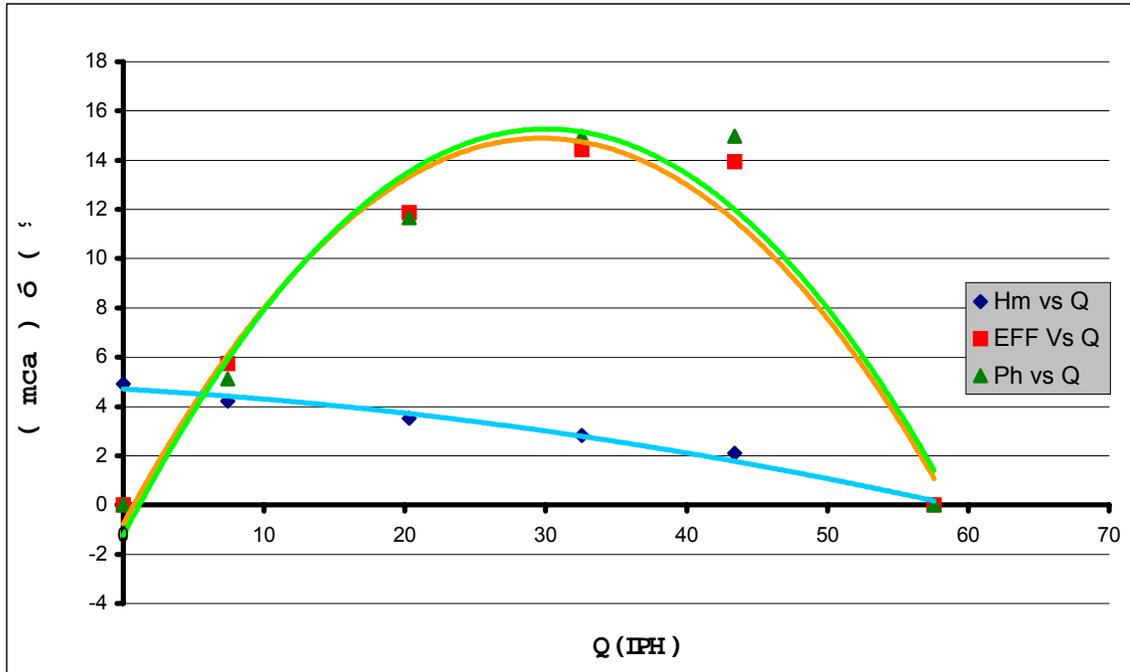


Figura 4.3.5 Curvas características de la bomba número 2 con velocidad alta; cuando $h_s = 0.40$ m.

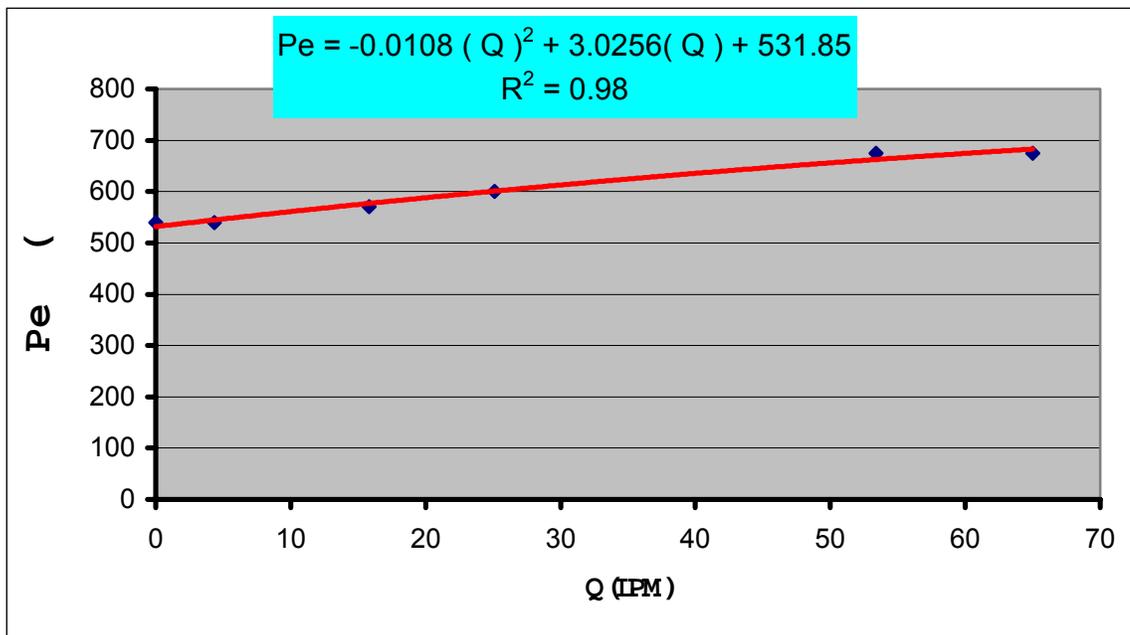


Figura 4.3.6 Curva característica de Potencia eléctrica (Pe) vs Gasto (Q); cuando $h_s = 0.40$ m.

Relación Hd vs Q

Al igual que en los casos anteriores, la curva característica obtenida al correlacionar estas dos variables de la bomba centrífuga (Figura 4.3.1), tiene la misma tendencia y la cual concuerda con la teoría que rigen el funcionamiento de las turbomáquinas, es decir, a mayor gasto menor carga y viceversa.

En esta bomba centrífuga se obtuvo un gasto máximo de 64.99 LPM contra un valor de la carga de descarga equivalente a cero metros de columna de agua, en tanto que la máxima carga que se registró en el manómetro fue de un valor de 13.36 metros de columna de agua.

Relación Ph vs Q

La curva característica obtenida de la Potencia hidráulica en función del gasto muestra la misma tendencia que en los casos estudiados anteriormente (Figura 4.3.2). La cual para esta bomba centrífuga tiene un valor inicial de cero W hasta llegar a un valor máximo de 40 W y a partir de este punto la curva sufre una caída hasta alcanzar un valor final de cero W, obviamente cuando se obtiene el máximo gasto y la mínima carga que en este caso es de 64.99 LPM y 0 mca respectivamente.

Relación η vs Q

La ecuación que rige la eficiencia del sistema motor-bomba es la siguiente: $\eta = - 0.0057 Q^2 + 0.3764 Q + 0.0535$, con un coeficiente de determinación del 96 %. Se observa en la gráfica de la curva característica de esta relación (Figura 4.3.3), que el valor de la máxima eficiencia es casi del 7 %, valor que está muy por debajo del rango esperado, pero la razón de este resultado es que la potencia eléctrica consumida por el motor es sumamente alta con respecto a la potencia hidráulica, cuyos resultados obtenidos con los datos experimentales para alcanzar esta eficiencia fueron de 600 y 37.52 W respectivamente. Con las observaciones hechas en cada una de las pruebas realizadas se puede decir que mucha potencia eléctrica consumida se pierde

en el calentamiento del motor en lugar de transformarla en potencia líquida o hidráulica.

Relación RPM vs Q

Con la correlación de los datos experimentales obtenidos de estas dos variables, se obtuvo la curva característica de esta relación con la siguiente ecuación polinomial de segundo grado: $RPM = 0.0022 Q^2 - 0.5625 Q + 2\ 888.6$, con un coeficiente de determinación del 98 %. En la gráfica de la figura 4.3.4 se observa una tendencia igual a las obtenidas en las demás bombas anteriores, en la que las revoluciones del impulsor son mayores a valores grandes de carga de descarga y pequeños gastos.

En la tabla que se muestra a continuación contiene los resultados obtenidos con las ecuaciones de las curvas características en el punto de máxima eficiencia de la bomba número 2 con velocidad alta.

Cuadro 4.9. Valores de las variables en punto de máxima eficiencia de la bomba número 2 con velocidad alta del motor.

RPM	Hd mca	Q LPM	Ph W	Pe W	n %
2 872	7.6	33	41.4	620	6.27

V. CONCLUSIONES

Finalmente con los resultados obtenidos y con las observaciones hechas durante el trabajo de campo de esta investigación se tienen la siguientes conclusiones:

- Las curvas características obtenidas para estas bombas centrífugas con motor de corriente continua difieren de las trazadas para bombas convencionales o con motor de corriente alterna, ya que en éstas últimas las relaciones entre carga H , potencia hidráulica (Ph) y eficiencia contra gasto (Q) son trazadas a velocidad constante o sea el valor de las revoluciones por minuto a las que gira el impulsor no varía (Karassik y Carter 1971), mientras que en las de corriente continua, las revoluciones del impulsor varían para cada valor de cierto gasto y carga de descarga.
- El motor de estas turbomáquinas opera a mayores revoluciones cuando se tienen valores grandes de carga y pequeños gastos. Además otra característica importante en el funcionamiento de los motores de las bombas centrífugas evaluadas es que a valores máximos de las revoluciones por minuto es menor la potencia eléctrica consumida por el motor.
- En este tipo de bombas el gasto disminuye a medida que aumentan las revoluciones por minuto del impulsor.
- La función matemática que presentó mayor ajuste en la correlación de la variables para la obtención de las curvas características de H_d vs Q , Ph vs Q , n vs Q , RPM vs Q y Pe vs Q , fue la función cuadrática (polinomial

de segundo grado), presentándose coeficientes de determinación comprendidos entre 93 y 99%.

- De todos los resultados obtenidos se observa que los datos que están por debajo del nivel esperado son los de eficiencia de bombeo. Usualmente ésta se encuentra dentro de un rango de 40 – 70 % (Torres, 1976), dependiendo de los tipos de motor y bomba.
- La bomba número 1 es la que presenta mayor eficiencia con un valor aproximado del 15 % cuando el gasto y la carga de descarga de la bomba es de 30 LPM y 5.2 metros de columna de agua respectivamente, mientras que en la bomba número 2 la mejor eficiencia se obtiene cuando ésta opera con la velocidad baja con un valor del 11.5 % comparado con un 6.3 % de eficiencia al trabajar el motor con la velocidad, aunque ambas eficiencias se alcanzan con un gasto de 33 LPM contra una carga de descarga de 5.2 mca con la velocidad baja y 7.6 mca con la alta.
- La primera suposición que se tiene con respecto a estas bajas eficiencias se debe a que los motores de corriente continua empleados son de medio uso y posiblemente gran parte de la potencia eléctrica consumida es transformada en calor.
- Se cumplen las leyes de afinidad que rigen el funcionamiento de las bombas centrífugas cuando la velocidad (RPM) cambia (Karissik y Carter, 1971), para la bomba número 1 en el punto de máxima eficiencia, tomando en cuenta los datos proporcionados por el fabricante de la bomba centrífuga. Más no sucede lo mismo con la bomba número 2 ya que gran parte de la potencia eléctrica consumida se pierde por calentamiento.

- La potencia eléctrica consumida por el motor de ambas bombas se incrementa a menudo que el gasto aumenta, esto debido aumenta la demanda corriente mientras que el voltaje se mantiene constante.
- La bomba centrífuga número 1 es la que presenta una mejor eficiencia operando con rango de potencia baja (85 – 113 Watts).
- Se puede mejorar el rendimiento de las dos bombas centrífugas utilizando impulsores para mayor carga y menor gasto, es decir, con impulsores cerrados de mayor número de álabes.

VI. RECOMENDACIONES:

- Continuar con la investigación, probando los motores con bombas centrífugas de menor tamaño con impulsores de menor diámetro y mayor número de álabes que las utilizadas en este trabajo, para obtener un mejor rendimiento.
- Adquirir un mayor número de paneles solares para contar con una mayor potencia eléctrica e instrumentos de medición que se necesitan para realización de las pruebas como tacómetros, manómetros, vacuómetros, multímetros entre otros.
- Realizar un estudio estadístico sobre los parámetros de funcionamiento de los motores de corriente continua utilizados en este trabajo.
- Diseñar y construir un banco de pruebas para bombas centrífugas de esta naturaleza.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Manuel Polo Encinas, (1980). Turbomáquinas Hidráulicas. 2ª Edición. Editorial Limusa S.A. México, D.F. P. 39 – 44.

Tyler G. Hicks, Bme. (1976). Bombas Selección y Aplicación. Editorial Continental, S.A. México, D.F. P. 19 – 46.

S.R.H. (1974). Proyectos de plantas de bombeo. México, D.F. Secretaría de Recursos hidráulicos. P. 90 – 106.

Karissik Igor J. y Carter Roy, (1971). Bombas Centrifugas. Selección, operación y Mantenimiento. Editorial Continental, S.A. México, D.F. P. 232-235.

Sandia National Laboratories. (1994). Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica. Volumen 1. México.

Hallyday David y Resnik Robert (1979). Física. Parte II. Editorial Continental, S. A., México.

Stollberg Robert y Hill Faith Fitch, (1981). Física. Fundamentos y Fronteras. Segunda Edición. Editorial Publicaciones Cultural, S.A. México, D.F.

Villareal R. F. (2001). Apuntes de Equipos y sistemas de Bombeo. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Lister Eugene C. (1977). Máquina y circuitos eléctricos. Introducción a la electricidad practica. Editoria Mc Graw-Hill. México D.F.

Dirección Electrónica:

<http://medusa.unimet.edu.ve/mecanica/fpim05.doc>

<http://www.geocities.com/SunsetStrip/Amphitheatre/5064/cfc.html>

[http://www.lafacu.com/apuntes/fisica/Eficiencia de un motor/default.htm](http://www.lafacu.com/apuntes/fisica/Eficiencia_de_un_motor/default.htm)

<http://www.conae.gob.mx/wb/distribuidor.jsp?seccion=2369>

<http://alek.pucp.edu.pe/cursos/pregrado/iee215/motordc/descdc.htm>

<http://www.doschivos.com/neuen/bombcucv.htm>

