

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA
DETERMINAR LAS CURVAS CARACTERISTICAS DE UNA BOMBA
CENTRIFUGA

ALVARO FERNANDO GRIJALVA FUERTES
LUIS FERNANDO ZURA MORILLO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO

2003

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA
DETERMINAR LAS CURVAS CARACTERISTICAS DE UNA BOMBA
CENTRIFUGA

ALVARO FERNANDO GRIJALVA FUERTES
LUIS FERNANDO ZURA MORILLO

Trabajo de grado para optar al titulo de Ingenieros Civiles

Director de proyecto:
RICARDO ARTURO INSUASTY
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO

2003

" Las ideas y conclusiones aportadas en el trabajo de grado, son de responsabilidad exclusiva de sus autores las cuales pueden con el tiempo estar sometidas a cambios"

Art. 1, del acuerdo número 324 de Octubre 11 de 1996, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

San Juan de Pasto, 24 de noviembre del 2003

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

San Juan de Pasto, 24 de noviembre del 2003

A DIOS quien es la guía y protección para poder caminar con firmeza y certeza en todos los momentos de la vida.

A AMPARO, mi MADRE, que es la razón más importante de mi vida, gracias por su inmenso sacrificio, por haberme dado el regalo de poder culminar satisfactoriamente mi carrera. Que DIOS la bendiga siempre.

A mis ABUELOS, por sus sabios consejos, la enseñanza de los valores morales y cristianos y por brindarme el afecto y cariño necesario para salir adelante. Para ustedes este triunfo.

A mi hermanito DAVID, quien con su inocente sonrisa hacer olvidar los momentos difíciles y con su ternura brinda amor y alegría.

A mis TIOS, por su gran apoyo, por enseñarme cada día a comprender el verdadero significado de la vida y por estar siempre en todo momento.

A todos mis familiares y amigos que de alguna u otra manera han contribuido para poder forjar mis metas.

ALVARO FERNANDO GRIJALVA FUERTES.

Dedico este trabajo a DIOS, por haberme dado todo.

A ANA MARIA, mi MADRE, por su sacrificio, sus desvelos y por haberme enseñado a afrontar la vida como una serie de retos que hay que superar para convertirse en una persona mejor.

A mi padre, LUIS ALBERTO (Q.E.P.D), por sus enseñanzas y consejos que en vida supo brindarme para ser una persona responsable y capaz de superar las dificultades.

A mi esposa RUTH JOHANNA y MI HIJO SANTIAGO, por ser la razón más importante para seguir luchando y afrontando con madurez las circunstancias que me impone la vida diaria.

A mi abuelita CARMEN y a mi hermana ANA LUCIA, por su apoyo incondicional y desinteresado.

Y a todos mis amigos y familiares que de alguna u otra manera me han apoyado.

LUIS FERNANDO ZURA MORILLO.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

Al Ingeniero Jaime Castillo González (Q.E.P.D), quien fue el gestor de esta gran idea para realizar este trabajo de grado.

Al Ingeniero Ricardo Arturo Insuasty director del trabajo de grado por su amistad y colaboración.

A Roberto García laboratorista de hidráulica quien de una manera desinteresada y con su experiencia colaboró para realizar el montaje del banco de pruebas.

Al Ingeniero Andrés Pantoja por su colaboración en el diseño, construcción e instalación del sistema digital.

Al Ingeniero Ivan Sánchez, jurado del proyecto, quien con su experiencia y conocimientos, contribuyó para mejorar nuestro trabajo de grado.

Al Ingeniero Luis Alfredo Jiménez, jurado del proyecto, quien con su experiencia y conocimientos, contribuyó para mejorar nuestro trabajo de grado.

A la Universidad de Nariño, por la formación académica, en especial a la Facultad de Ingeniería.

A todas las personas que de alguna u otra manera contribuyeron para poder realizar satisfactoriamente este trabajo de grado.

CONTENIDO

	pág.
GLOSARIO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCION	
1 OBJETIVOS	29
1.1 OBJETIVO GENERAL	29
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	29
2 CONCEPTOS GENERALES	30
2.1 BOMBAS	30
2.2 CLASIFICACION	31
2.2.1 Bombas de desplazamiento positivo	31
2.2.2 Bombas rotodinámicas	32
2.3 BOMBAS CENTRIFUGAS	33
2.3.1 Bombas radiales	37
2.3.2 Bombas mixtas	37
2.3.3 Bombas axiales	37
2.3.4 Bombas de turbina	38
2.3.5 Bombas en voluta	39
2.4 PERDIDAS	40
2.4.1 Pérdidas hidráulicas	40
2.4.2 Pérdidas volumétricas	41
2.4.3 Pérdidas mecánicas	41
2.5 POTENCIA Y RENDIMIENTO	42

2.6	VELOCIDAD ESPECÍFICA	44
2.7	ALTURA	44
2.7.1	Altura geométrica	44
2.7.2	Altura manométrica	45
2.8	PERDIDA DE CARGA	45
2.9	CURVA CARACTERISTICA	45
2.10	ENERGIA CINETICA	46
2.11	NPSH= ALTURA NETA POSITIVA DE SUCCIÓN	46
2.12	CAVITACION	47
2.13	NUMERO DE REVOLUCIONES	47
2.14	POTENCIA ABSORBIDA	47
2.15	POTENCIA ABSORBIDA POR EL MOTOR	47
2.16	RENDIMIENTO MECANICO	48
2.17	PRESION	48
2.17.	Relación entre presión y elevación	48
1		
2.18	PRINCIPIOS BASICOS DEL TEOREMA DE BERNOULLI	50
3	DESCRIPCION DEL BANCO DE PRUEBAS	52
3.1	ELEMENTOS Y MATERIALES	53
3.2	CARACTERISTICAS BASICAS DE BANCO DE PRUEBAS	53
4	CALCULOS PRINCIPALES DEL BANCO DE PRUEBAS.	61
4.1	CALCULO DE DIAMETROS	61
4.1.1	Diámetro de la tubería de succión	61
4.1.2	Diámetro de la tubería de impulsión o descarga	62
4.2	CALCULO DE PERDIDAS	63
4.2.1	Pérdidas por fricción	63
4.2.2	Pérdidas menores	65
4.3	DISEÑO DEL VERTEDERO	70
4.3.1	Vertedero	70

4.3.2	Vertederos rectangulares	72
4.3.3	Dimensionamiento del vertedero rectangular	73
4.4	DISEÑO TANQUE DE CARGA Y DESCARGA	81
4.4.1	Dimensionamiento del tanque	81
4.5	DISEÑO CAMARA DE AQUIETAMIENTO	83
4.6	CALCULO DE LA ALTURA GEOMETRICA	85
4.7	CALCULO DE LA ALTURA MANOMETRICA	85
4.8	CALCULO DEL NPSH NECESARIO PARA LA BOMBA	86
4.8.1	NPSH Disponible	86
5	CURVAS CARACTERISTICAS	89
5.1	GENERALIDADES	89
5.1.1	Curva caudal – altura	90
5.1.2	Curva de potencia	91
5.1.3	Curva de eficiencia	91
5.2	ECUACION DE LA BOMBA CENTRIFUGA	92
5.3	OBTENCION CURVAS CARACTERISTICAS	94
5.3.1	CURVA CAUDAL – ALTURA	94
5.4	CURVAS CARACTERISTICAS DEL BANCO DE PRUEBAS	101
5.4.1	Curva caudal – altura	101
5.4.2	Punto de operación	106
5.4.3	Curva potencia, eficiencia – caudal	116
6.	INSTALACION	126
7.	MANUAL DE LABORATORIO	131
7.1	Objetivos	131
7.1.1	Generales	131
7.1.2	Específicos	131
7.2	MARCO TEORICO	132
7.2.1	Obtención curva caudal – altura	132

7.2.2	Obtención curva potencial, eficiencia vs caudal	134
7.3	DESCRIPCION DEL EQUIPO	135
7.4	PROCEDIMIENTO	136
7.5	DESARROLLO DE LA PRUEBA	137
7.6	TABLA DE DATOS Y CALCULOS	138
7.7	INFORME DE LABORATORIO	138
7.7.1	Curva caudal altura	138
7.7.2	Curva eficiencia, potencia vs caudal.	138
8.	CONCLUSIONES	141
9.	RECOMENDACIONES	143

BIBLIOGRAFIA

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Velocidad Máxima en Tuberías de Succión	61
Cuadro 2. Coeficientes de Resistencia por Entrada	66
Cuadro 3. Coeficiente de resistencia para Ampliación Brusca	67
Cuadro 4. Longitudes Equivalentes en Tuberías.	69
Cuadro 5. Datos encontrados para realizar la Calibración del Vertedero	77
Cuadro 6. Regla Altura Caudal del Vertedero	80
Cuadro 7. Valores de Caudal y Altura de las curvas del fabricante de la bomba	93
Cuadro 8. Relación Caudal - Altura para 3645 rpm	97
Cuadro 9. Relación Caudal – Altura para 3585 rpm	99
Cuadro 10. Relación Caudal – Altura del modelo para 3645 rpm	102
Cuadro 11. Altura de Elevación de la Bomba para 3645 rpm	107
Cuadro 12. Altura de Elevación de la Bomba para 3585 rpm	109
Cuadro 13. Altura de Elevación de la Bomba para 3585 rpm	110
Cuadro 14. Relación Caudal – Altura de la tubería para 3645 rpm	112
Cuadro 15. Relación Caudal – Altura de la tubería para 3585 rpm	114
Cuadro 16. Relación Potencia, eficiencia - Caudal para 3645 rpm	119
Cuadro 17. Relación Potencia, eficiencia - Caudal para 3585 rpm	123
Cuadro 18. Formato de datos y cálculos	139

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema general de una bomba	30
Figura 2. Partes de una bomba centrífuga	35
Figura 3. Componentes de una bomba radial	37
Figura 4. Componentes de una bomba axial	38
Figura 5. Forma de los impulsores de una bomba de turbina	39
Figura 6. Esquema de la carcasa de una bomba en voluta	40
Figura 7. Banco de pruebas para determinar las curvas Características de una bomba centrífuga	52
Figura 8. Bomba centrífuga	54
Figura 9. Tanque de carga y descarga	55
Figura 10. Vertedero	56
Figura 11. Cámara de quietamiento	57
Figura 12. Válvula de compuerta	58
Figura 13. Manómetro en U de mercurio	59
Figura 14. Manómetro de glicerina tipo Bourdon	59
Figura 15. Elementos del sistema digital	60
Figura 16. Universales	60
Figura 17. Entrada tipo borda	66
Figura 18. Esquema general de un vertedero	71
Figura 19. Sistema utilizado para la medición de flujo y Patronamiento de vertederos	75
Figura 20. Patronamiento del vertedero rectangular	75
Figura 21. Determinación del volumen en el patronamiento del Vertedero	76

Figura 22.	Curva de calibración del vertedero rectangular	79
Figura 23.	Diseño de la cámara de aquietamiento	85
Figura 24.	Curva caudal - altura para 3645 rpm	98
Figura 25.	Curva caudal - altura para 3585 rpm	100
Figura 26.	Curva caudal - altura del modelo para 3645 rpm	108
Figura 27.	Curva caudal - altura del modelo para 3585 rpm	111
Figura 28.	Curva caudal - altura de la tubería para 3645 rpm	113
Figura 29.	Curva caudal - altura de la tubería para 3585 rpm	115
Figura 30.	Curva potencia - caudal 3645 rpm	120
Figura 31.	Curva potencia - caudal 3585 rpm	122
Figura 32.	Curva eficiencia - caudal 3645 rpm	124
Figura 33.	Curva eficiencia - caudal 3585 rpm	125

GLOSARIO

ACCESORIO. elemento auxiliar que sirve para posibilitar el empleo de otro, en hidráulica sirve para facilitar la instalación de varias tuberías.

AFORAR. medir la cantidad de agua que lleva una corriente en una unidad de tiempo.

BOMBLEAR. elevar agua o cualquier otro líquido usando algún tipo de mecanismo.

CINTA TEFLÓN. material plástico fluorado resistente a la corrosión, se usa en instalaciones hidráulicas para hacer sello hermético en uniones roscadas.

MOTOBOMBA. mecanismo empleado para impulsar agua, con la Energía suministrada por un motor eléctrico o de explosión.

NIPLA. tramo de tubería recta lisa o roscada que sirve para unir dos accesorios.

MANÓMETRO. instrumento que permite medir la presión.

PVC. cloruro de Polivinilo, material plástico usado para la fabricación de tuberías

RDE. es la relación existente entre el diámetro de una tubería y el espesor de sus paredes.

VÁLVULA. dispositivo de cierre que regula el paso de un fluido por un conducto o tubería.

RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo fundamental de este trabajo es dotar a la Facultad de Ingeniería Civil de un modelo didáctico el cual se denomina BANCO DE PRUEBAS PARA DETERMINAR LAS CURVAS CARACTERISTICAS DE UNA BOMBA CENTRIFUGA. Este sistema será un apoyo para los estudiantes que estén relacionados con el estudio de la parte hidráulica.

El diseño del modelo está orientado a que cumpla con los diferentes parámetros relacionados con la teoría de bombas para así garantizar un correcto funcionamiento del banco de pruebas.

El banco de pruebas consta de las siguientes partes:

Una bomba centrífuga de 1 Hp, motor WEG; tanque de carga y descarga con una cámara con orificios para regular el flujo y un vertedero rectangular para la medida del caudal; sistema digital para la medición de voltaje, amperaje y las rpm; accesorios: codos, válvula de compuerta, universales, adaptadores; sistema de tubería; Manómetros para medir la presión en la succión y en la descarga; Soporte del banco de pruebas.

El cálculo de los diámetros se hizo teniendo en cuenta los parámetros para que estos sean los más adecuados y son: en la tubería de succión 1½" y en la tubería de descarga 2".

El vertedero rectangular es el adecuado para la medición de este tipo de caudales. Se realizó la calibración del vertedero obteniendo puntos mediante aforos volumétricos y lecturas de altura las cuales se ajustan de una forma muy aproximada a una curva de calibración. Además a través de esta curva de

calibración se obtiene la ecuación del vertedero la cual es necesaria para poder obtener mediciones de diferentes caudales que circulan en el sistema.

El tanque trabaja adecuadamente. Este proporciona la carga necesaria para el buen funcionamiento del modelo y además sirve como tanque de descarga. Es por eso que este sistema funciona como un circuito cerrado.

Se tiene instalado un sistema digital el cual determina la medición del voltaje, amperaje y las revoluciones en la unidad de tiempo. El sistema consta de una serie de elementos y dispositivos necesarios para estos objetivos.

Además el banco de pruebas se compone de tubería y accesorios para así garantizar un adecuado funcionamiento.

A través de la manipulación de la válvula de compuerta y las diferentes lecturas de presión que se hacen en los manómetros instalados en la succión y descarga y la medición del voltaje, amperaje y las RPM a través del sistema digital, se puede hacer el estudio de la bomba centrífuga para así obtener las curvas características relacionadas con ésta las cuales son: **Curva caudal – altura, Curva caudal – potencia, Curva caudal – eficiencia.**

La curva caudal – altura de la bomba, representa las distintas cantidades de agua que son suministradas por la bomba al vaciar la carga. Esta curva se obtiene utilizando la ecuación de Bernoulli la cual se expresa así: $p/\tau + v^2/2g + Z$.

La curva de potencia determina la cantidad de energía necesaria para accionar una bomba. El factor de potencia viene dado en las especificaciones de la bomba y es indispensable para aplicarlo en la expresión $P = V * I * \text{Cos } \theta$. Su valor es igual a 0,72. Esta expresión representa la potencia absorbida por la bomba.

La potencia útil se expresa así: $P = \tau * Q * H / 75$ la cual se calcula midiendo el caudal y la altura de elevación de la bomba.

El rendimiento o eficiencia total representa la cantidad de trabajo aprovechable por la bomba y es la relación entre la potencia útil y la potencia absorbida.

Como ayuda didáctica para los estudiantes se realizó un manual de práctica de laboratorio con el cual pueden comprender mejor los conceptos y la manera de obtener las curvas características de la bomba centrífuga.

ABSTRACT

The fundamental objective of this work is to endow to the Ability of Civil Engineering of a didactic model which is denominated BANK OF TESTS to DETERMINE THE CHARACTERISTIC CURVES OF A BOMB CENTRIFUGES. This system will be a support for the students that are related with the study of the hydraulic part.

The design of the pattern is guided to that completes with the different parameters related with the theory of bombs it stops this way to guarantee a correct operation of the bank of tests.

The bank of tests consists of the following parts:

A centrifugal bomb of 1 Hp, motor WEG; load tank and it discharges with a camera with holes to regulate the flow and a rectangular drain for the measure of the flow; digital system for the voltage mensuration, amperage and the rpm; accessories: elbows, floodgate valve, universal, adapters; pipe system; Gauges to measure the pressure in the suction and in the discharge; it Supports of the bank of tests.

The calculation of the diameters was made keeping in mind the parameters so that these they are the most appropriate and they are: in the suction pipe 1½” and in the discharge pipe 2.”

The rectangular drain is the appropriate one for the mensuration of this type of flows. He/she was carried out the calibration of the drain obtaining points by means of seating capacity volumétricos and readings of height, which are adjusted from a very approximate way to a calibration curve. Also through this curve of

calibration is obtained the equation of the drain which is necessary to be able to obtain mensurations of different flows that circulate in the system.

The tank works appropriately. This provides the necessary load for the good operation of the pattern and it also serves as discharge tank. It is for that reason that this system works as a closed circuit.

One has installed a digital system for determines the mensuration of the voltage, amperage and the revolutions in the unit of time. The system consists of a series of elements and necessary devices for these objectives.

The bank of tests is also composed of pipe and accessories it stops this way to guarantee an appropriate operation.

Through the manipulation of the floodgate valve and the different readings of pressure that are made in the gauges installed in the suction and discharge and the mensuration of the voltage, amperage and the RPM through the digital system, one can make the study of the centrifugal bomb he/she stops this way to obtain the characteristic curves related with this which are: Curved flow–height, Curved flow–power, Curved flow–efficiency.

The curve flow–height of the bomb, represents the different quantities of water that they are given by the bomb when emptying the load. This curve is obtained using the equation of Bernoulli which is expressed this way: $p / (+ v^2/2g + Z$.

The curve of power determines the quantity of necessary energy to work a bomb. The factor of power comes given in the specifications of the bomb and it is indispensable to apply it in the expression $P = V * I * \text{Cos } (\cdot$. Their value is similar to 0,72. This expression represents the power absorbed by the bomb.

The useful power is expressed this way: $P = (Q * H / 75)$ which is calculated measuring the flow and the height of elevation of the bomb.

The yield or total efficiency represents the quantity of profitable work for the bomb and it is the relationship between the useful power and the absorbed power.

As help didactics for the students was carried out a manual of laboratory practice with which you/they can understand the concepts and the way better of obtaining the characteristic curves of the centrifugal bomb.

INTRODUCCION

Ante la falta de apoyo por parte de las entidades encargadas de dotar a las Universidades públicas y ante la apatía para aportar dichas soluciones, como estudiantes comprometidos con el progreso de nuestra institución se realiza el siguiente trabajo de grado el cual tiene por objetivo el diseño y construcción de un banco de pruebas para determinar las curvas características de una bomba centrífuga el cual será de mucha ayuda para los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería y servirá de material académico para el desarrollo de prácticas en las áreas relacionadas con el tema.

Todos los procesos industriales que sostienen nuestra civilización incluyen la transferencia de líquidos desde un nivel de presión o energía estática a otro y, como resultado de ello, las bombas se han convertido en una parte esencial de dichos procesos.

Los temas relacionados con bombas son muy amplios, es por eso que el contenido de este trabajo se limita a suministrar la información básica para familiarizarse con la teoría de bombas centrífugas en lo referente a los parámetros a tener en cuenta para el diseño y construcción del banco de pruebas, así como también dar conocer a los interesados en el tema de bombas centrífugas los aspectos generales a tener en cuenta en el momento de seleccionar una de estas para realizar un trabajo específico.

Como guía para los estudiantes de la Facultad de Ingeniería relacionados con la materia de hidráulica y sus afines, se incluye en este proyecto un manual de laboratorio donde se explica la determinación de las curvas características de una bomba centrífuga.

En sí el banco de pruebas será un modelo didáctico y de investigación para el estudiante que quiera profundizar y analizar más los temas que se relacionan al momento de hacer los ensayos como es la presión, pérdidas, medición de caudales, medición del voltaje, amperaje y rpm.

El sistema puede en el futuro modificarse en cuanto a la ubicación de sus partes que lo componen ya que son desmontables y al momento de hacer los ensayos se pueda tener otros criterios y compararlos con los del modelo propuesto en este trabajo.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un banco de pruebas para el estudio de bombas centrífugas, que sirva para conocer las relaciones existentes entre los diferentes parámetros y componentes que intervienen en el funcionamiento del banco de pruebas y obtención de las curvas características.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Construir el banco de pruebas basándose en los parámetros básicos de diseño.
- Realizar los cálculos de los parámetros que intervienen en el banco de pruebas para determinar las curvas características de una bomba centrífuga.
- Realizar los diferentes ensayos para la elaboración de las curvas características de la bomba centrífuga.
- Encontrar el punto de operación de la bomba, graficando las curvas características caudal – altura de la tubería y del sistema.
- Elaborar un manual de laboratorio para realizar la práctica de determinación de las curvas características de una bomba centrífuga.

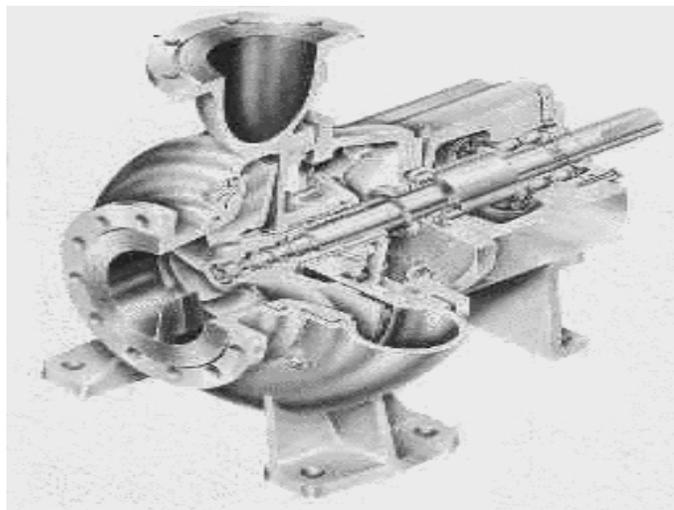
2. CONCEPTOS GENERALES

En el presente capítulo se tratara de una manera sencilla, los temas fundamentales que estén implicados en el diseño del banco de pruebas, limitándose a conceptos básicos para el estudio de bombas como: definición, clasificación, pérdidas, NPSH, potencia y rendimiento, en particular de las bombas centrífugas que será la utilizada en el banco de pruebas, para junto a ella estudiar los diferentes conceptos referidos al manejo y manipulación de tubería, accesorios y al tanque de carga y descarga con sus partes como vertedero y cámara de aquietamiento.

2.1 BOMBAS

DEFINICIÓN: bomba es una máquina que absorbe energía mecánica y restituye el líquido que la atraviesa por energía hidráulica.

Figura 1. Esquema general de una boma.



FUENTE: ZUBICARAY, Manuel. Bombas teoría diseño y aplicaciones. México: Limusa,1986.

"La bomba hidráulica es un transformador de energía; recibe energía mecánica que puede proceder de un motor eléctrico, térmico, etc., y la convierte en los fluidos bombeados, en energía de posición, de presión y de velocidad, por esto se les denomina máquinas movidas"¹.

2.2 CLASIFICACIÓN

Las bombas se clasifican en:

2.2.1 Bombas de desplazamiento positivo. Entregan una cantidad fija de fluido en cada revolución del rotor de la bomba, por lo tanto excepto los resbalamientos pequeños debido al paso libre del rotor y la estructura, la entrega o capacidad de la bomba no se ve afectada por los cambios en la presión que esta debe desarrollar, la mayoría de las bombas de desplazamiento positivo puede manejar líquidos con altas viscosidades.

Las bombas de desplazamiento positivo se pueden clasificar en:

- **Rotatorias o roto estáticas.** La dinámica de la corriente no juega un papel esencial en la transmisión de energía, estas pueden ser:

De engranes

De paleta

De tornillo

De cavidad progresiva

De lóbulo o alabe

¹ CHURCH, A. H. Bombas y máquinas soplantes centrífugas. La Habana: Pueblo y educación, 1976 P. 25.

- **Reciprocantes.** Estas pueden ser:

De pistón

De inmersión

De diafragma

2.2.2 Bombas rotodinámicas. Las bombas que son turbo máquinas pertenecen a este grupo, sus características son:

- Son siempre rotativas.
- Su funcionamiento se basa en la ECUACIÓN DE EULER.
- Su órgano transmisor se llama rodete.

Se llaman roto dinámicas porque su movimiento es rotativo y la dinámica del agua juega un papel esencial en la transmisión de energía. Las bombas roto dinámicas se pueden clasificar en:

Según la dirección del flujo.

- De flujo radial.
- De flujo axial.
- De flujo radio axial o mixtas.

Según la presión engendrada.

- De baja presión.
- De media presión.
- De alta presión.

Según la posición del eje.

- De eje vertical.
- De eje horizontal.
- De eje inclinado.

Según el número de rodetes y el número de flujos.

- De un escalonamiento.
- De varios escalonamientos.
- De simple aspiración o de un flujo.
- De doble aspiración o de dos flujos.

2.3 BOMBAS CENTRIFUGAS

"Una bomba centrífuga consiste de un juego de álabes rotatorios dentro de un alojamiento, o carcasa, que se utilizan para impartir energía a un fluido por medio de la fuerza centrífuga"².

Una bomba centrífuga transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en la energía cinética y potencial requeridas, son capaces de trabajar con sensible variación de gasto, presión y rotación. Funcionan a altas velocidades estando por lo general acopladas directamente al motor de accionamiento, con lo que se consigue que las pérdidas por transmisión sean mínimas.

² MOTT, Robert. Mecánica de fluidos aplicada, México: Prentice hall. 1996 P.419-421.

Estas bombas carecen de válvulas interiores que pueda ser causa de entorpecimiento o en dificultades en su funcionamiento y es posible asegurar su regulación automática basada en el caudal, la presión de aspiración o la presión de impulsión.

Las partes principales de una bomba centrífuga son: el impulsor con la flecha y la cámara que lo rodea (Ver figura 2).

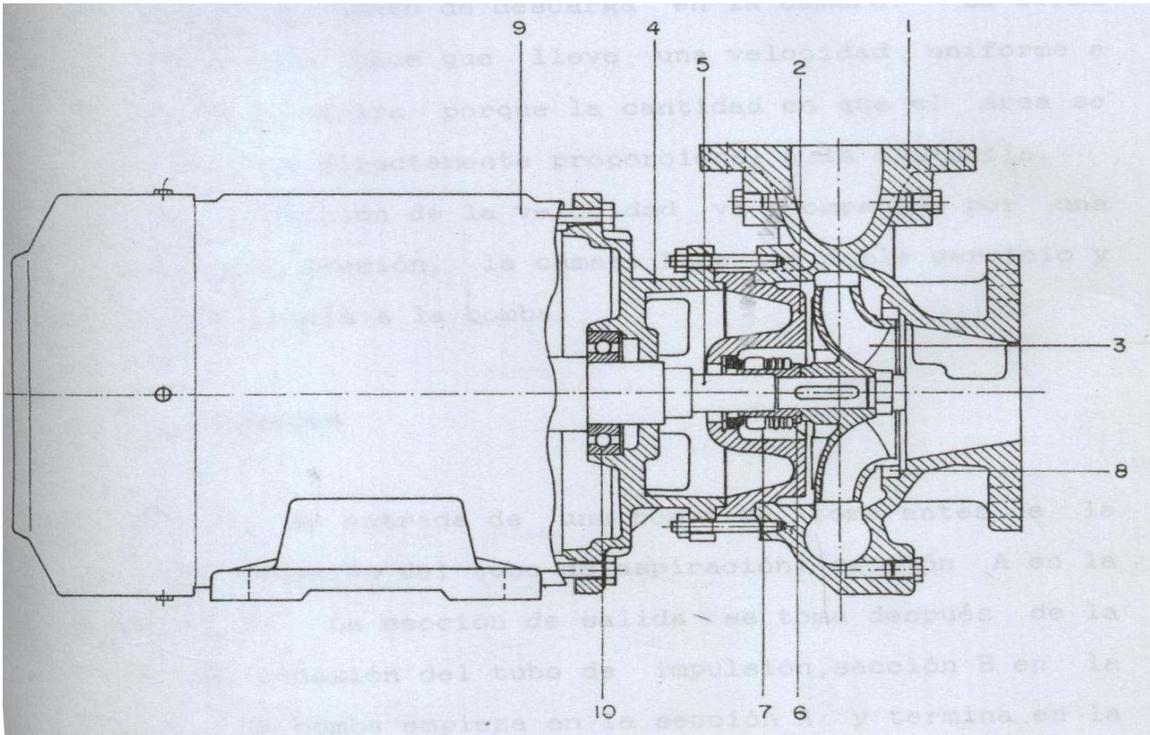
En una bomba centrífuga el líquido se fuerza a entrar en un juego de álabes rotatorios, mediante la presión atmosférica o cualquier otra clase de presión. Estos álabes constituyen un impulsor que descarga el líquido en su periferia a más alta velocidad. Esta velocidad se convierte en energía de presión por medio de una voluta o mediante un juego de álabes estacionarios de difusión rodeando la periferia del impulsor. Las bombas con carcazas de voluta se llaman generalmente bombas de voluta, mientras que aquéllas con álabes de difusión se llaman bombas de difusor. Las bombas de difusor se llamaron comúnmente durante algún tiempo bombas de turbina pero este término se ha aplicado recientemente en forma más selectiva a las bombas centrífugas de difusor verticales, de pozo profundo, a las que se les refiere comúnmente como bombas de turbina vertical.

Los impulsores se clasifican de acuerdo con la mayor dirección de flujo con respecto al eje de rotación. Así, las bombas centrífugas pueden tener:

- Impulsores de flujo radial.
- Impulsores de flujo axial.
- Impulsores de flujo mixto, que combinan los principios de flujo radial y axial.

Figura 2. Partes de una bomba centrífuga.

- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1. Carcasa. | 6. Casquillo del eje. |
| 2. Tapa de carcasa. | 7. Sello mecánico. |
| 3. Impulsor. | 8. Anillo de desgaste. |
| 4. Tapa portacojinete. | 9. Motor. |
| 5. Eje. | 10. rodamiento. |



FUENTE: CATALOGO. Bombas Sihi Halberg. Bogotá D.C.

Además, los impulsores se clasifican también como:

1. De succión simple, con una admisión simple a un lado.
2. De doble succión, con agua fluyendo hacia el impulsor en forma simétrica, de los dos lados.

La construcción mecánica de los impulsores origina aún una subdivisión más en:

1. Cerrados, con placas de refuerzo o paredes laterales que imitan a los conductos para el agua.
2. Abiertos, sin paredes de refuerzo.
3. Semiabiertos o semicerrados.

Si la bomba es tal que la carga se origina con un solo impulsor, se llama bomba de un solo paso. Con frecuencia, la carga total por desarrollarse requiere el uso de dos o más impulsores operando en serie, cada uno haciendo la succión de la descarga del impulsor precedente. Para este propósito pueden conectarse dos o más bombas de un solo paso en serie o bien todos los impulsores pueden incorporarse en una sola carcasa. La unidad recibe el nombre entonces de bomba de pasos múltiples.

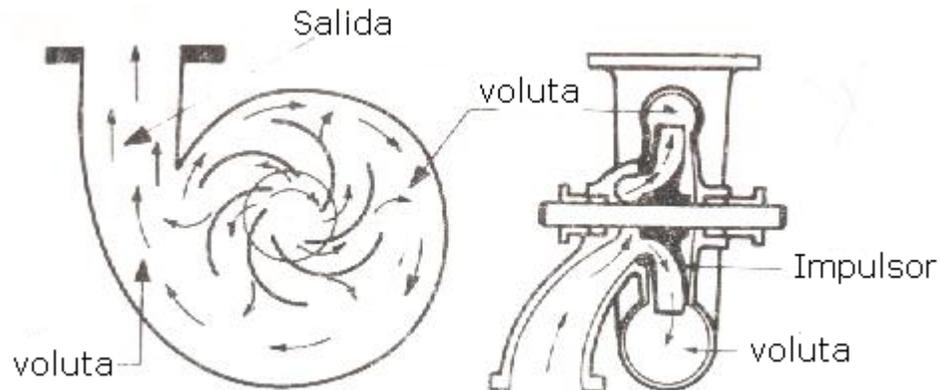
El diseño mecánico de la carcasa proporciona además, la clasificación de las bombas axialmente partidas, mientras que el eje de reacción determina si se trata de una unidad horizontal o vertical. Las bombas centrífugas de flecha horizontal se clasifican aun de acuerdo con la localización de la tobera de succión:

- a) De succión al extremo.
- b) De succión lateral.
- c) De succión al fondo.
- d) De succión superior.

Las bombas centrífugas se pueden clasificar así:

2.3.1 Bombas Radiales. Que son aquellas en las cuales el líquido entra al impulsor mas o menos en dirección de su eje y sale radialmente, en dirección perpendicular a él³. (Ver figura 3).

Figura 3. Componentes de una bomba radial.



FUENTE: CASTILLA, Antonio y GALVIS, Gerardo. Bombas y estaciones de bombeo. Cali: Cinara, 1993. P. 61.

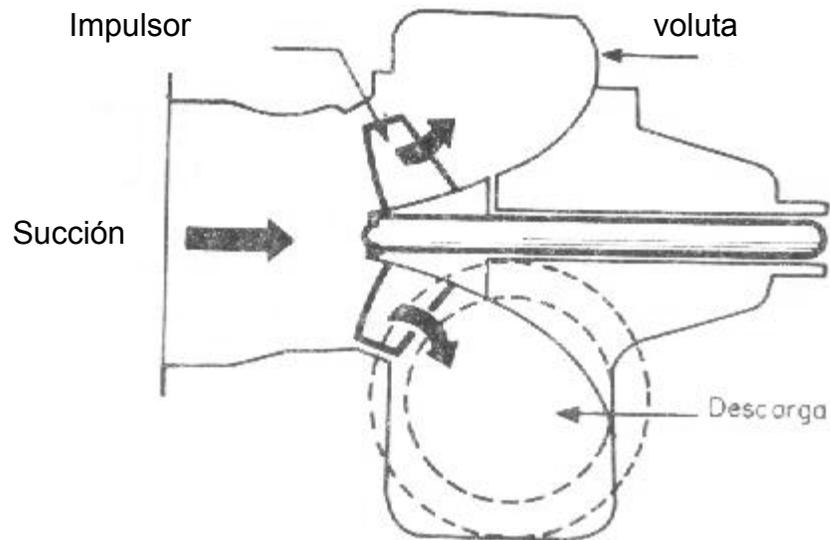
2.3.2 Bombas Mixtas. En las cuales la velocidad del agua tiene componentes axiales y radiales. (Ver figura 4).

2.3.3 Bombas Axiales. En las cuales el líquido bombeado se mueve en la dirección del eje de la bomba desde la entrada hasta la salida del líquido bombeado. En estas bombas no existe una acción centrífuga, pero la bomba se comporta como un caso límite de los dos anteriores, tanto en el tratamiento teórico de los conceptos como el diseño, razón por la cual:

- No se justifica una clasificación especial para este tipo de bombas.
- Se incluye dentro de la clasificación de bombas centrífugas.

³ CASTILLA, Antonio y GALVIS, Gerardo. Bombas y estaciones de bombeo. Cali Colombia: Cinara, 1993 P.57.

Figura 4. Componentes de una bomba mixta.

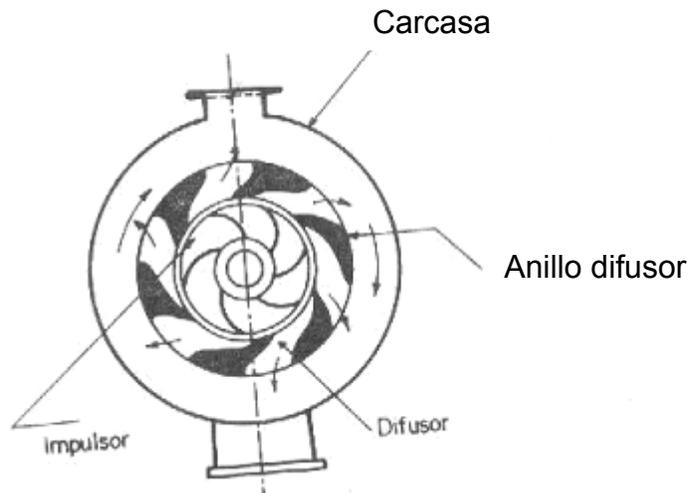


FUENTE: CASTILLA, Antonio y GALVIS, Gerardo. Bombas y estaciones de bombeo. Cali: Cinara, 1993. P. 61.

2.3.4 Bombas de Turbina. En las bombas de turbina ó turbinobombas el impulsor esta rodeado de una serie de paletas o álabes directrices fijos llamados difusores, porque en ellos se permite que la gran velocidad del líquido al salir del impulsor vaya disminuyendo gradualmente gracias a su forma divergente (Ver figura 5). Los difusores están colocados de forma tal que el paso del líquido proveniente del impulsor se efectúe sin choques, en cuanto sea posible. Después de su paso por los difusores el líquido pasa al espacio comprendido entre estos y la carcasa. Esta última puede ser concéntrica con respecto al eje del impulsor o excéntrica, con lo cual el espacio entre la carcasa y los difusores va aumentando gradualmente con el fin de conseguir que la velocidad del agua sea constante a su paso por la carcasa o que vaya aun disminuyendo gradualmente hasta buscar la brida de salida de la bomba⁴.

⁴ Ibid., p. 58-59.

Figura 5. Forma de los impulsores de una bomba de turbina.



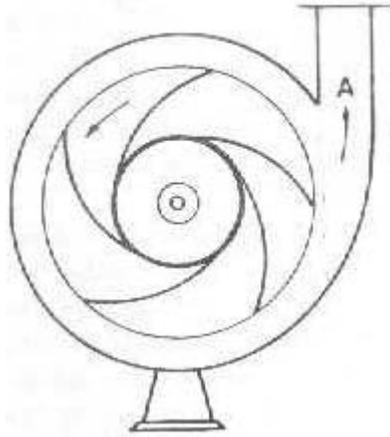
FUENTE: CASTILLA, Antonio y GALVIS, Gerardo. Bombas y estaciones de bombeo. Cali: Cinara, 1993. P. 58.

La bomba toma su nombre de su semejanza con las turbinas francis, en las cuales el líquido antes de pasar al rodete debe pasar por una serie de álabes que no rotan pero que son móviles y que se acomodan a las diferentes descargas tratando de mantener altas eficiencias sólo para una condición dada de descarga y velocidad de giro. Por esta razón y por su alto costo se usan cada vez menos en las operaciones industriales.

2.3.5 Bombas en voluta. En estas bombas se elimina el anillo difusor y la carcasa es excéntrica con respecto al impulsor. Como el área a partir del punto A hacia la izquierda (ver figura 6), va aumentando proporcionalmente, la velocidad en la carcasa permanece bastante uniforme. La carcasa puede también diseñarse para que la velocidad vaya disminuyendo gradualmente a medida que se acerca al punto de descarga. Las bombas de voluta se clasifican en bombas de succión simple y de succión doble según que el impulsor reciba agua de un solo lado o de ambos⁵.

⁵ Ibid., p.60-61.

Figura 6. Esquema de la carcasa de una bomba en voluta.



FUENTE: CASTILLA, Antonio y GALVIS, Gerardo. Bombas y estaciones de bombeo. Cali: Cinara, 1993. P. 60.

2.4 PERDIDAS

Todas las de energía que tienen lugar en la sección de entrada y de salida de una bomba son imputables a ella y disminuyen su rendimiento, pero las pérdidas que tienen lugar antes de la sección de entrada (tubo de aspiración) y después de la sección de salida (tubo de impulsión) son imputables a la instalación y disminuyen el rendimiento de la instalación, no el de la bomba. Las pérdidas se pueden clasificar en 3 grupos, así:

2.4.1 Pérdidas hidráulicas. Disminuyen la energía específica útil que la bomba comunica al fluido y consiguientemente la altura útil, son de 2 clases:

- **Pérdidas de superficie:** Se producen por el rozamiento del fluido con las paredes de la bomba o de las partículas del fluido entre sí.

- **Pérdidas de forma:** Se producen por el desprendimiento de la capa límite en los cambios de dirección y en toda forma difícil al flujo.

2.4.2 Pérdidas volumétricas. También son conocidas como intersticiales, son pérdidas de caudal y se dividen en 2, pérdidas interiores y pérdidas exteriores.

Las pérdidas exteriores constituyen una salpicadura al exterior que se escapa por el juego entre la carcasa y el eje de la bomba.

Las pérdidas volumétricas son las más importantes y reducen el rendimiento volumétrico de las bombas.

2.4.3 Pérdidas mecánicas. Incluyen las pérdidas por:

- Rozamiento de la prensa estopas con el eje de la máquina.
- Rozamiento del eje con los cojinetes.
- Accionamiento de auxiliares.
- Rozamiento de disco. Se llama así al rozamiento de la pared exterior del rodete con la atmósfera del fluido que lo rodea.

En general las pérdidas mecánicas son ocasionadas por el rozamiento de algunas partes internas de la bomba⁶.

⁶ JIMENEZ, Doris Y MOLINA, Claudia. Montaje estudio de un modelo didactico de bombas en serie y en paralelo. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño, 1993 P. 2-5.

2.5 POTENCIA Y RENDIMIENTO

Las bombas centrífugas presentan las siguientes potencias y rendimientos:

- **Potencia de accionamiento (Pa).**

Es la potencia en el eje de la bomba o potencia mecánica que la bomba absorbe, esta potencia mecánica tiene la siguiente expresión.

$$P_a = 2\pi / 60 n m \quad (\text{Ec. 1})$$

n = mide revoluciones.

- **Potencia interna (Pi).** Es la potencia total transmitida al fluido, o sea la potencia de accionamiento descontando todas las pérdidas mecánicas (Pm).

$$P_i = P_a - P_m \quad (\text{Ec. 2})$$

- **Potencia útil (P).** Es la potencia de accionamiento descontando todas las pérdidas de la bomba o equivalentemente la potencia interna descontando todas y solo las pérdidas internas (hidráulicas (Ph) y volumétricas(Pv)).

$$P = P_a - P_m - P_v - P_h \quad (\text{Ec. 3})$$

$$P = Q * \gamma * g * h \quad (\text{Ec. 4})$$

Q = caudal, γ = Peso específico del líquido, g = gravedad y h = Altura.

- **Rendimiento hidráulico (N).** Tiene en cuenta todas y solo las pérdidas de altura total, H = altura total y Hu = altura útil.

$$N = H / H_u \quad (\text{Ec. 5})$$

- **Rendimiento volumétrico.** Tiene en cuenta todas y solo las pérdidas volumétricas. Su valor es:

$$N_v = Q / (Q + q_a + q_i) \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

Q = Caudal útil o caudal efectivo impulsado por la bomba.

Q + q_a + q_i = Caudal teórico o caudal bombeado por el rodete.

q_a = Caudal de accionamiento.

q_i = Caudal interno.

- **Rendimiento interno (N_i).** Tiene en cuenta todas y solo las pérdidas internas, o sea las hidráulicas y volumétricas y engloba ambos rendimientos el hidráulico y el volumétrico.

$$N_i = P / P_i \quad (\text{Ec. 7})$$

- **Rendimiento mecánico (N_m).** Tiene en cuenta todas y solo las pérdidas mecánicas, su valor es:

$$N_m = P_i / P \quad (\text{Ec. 8})$$

- **Rendimiento total (N_t).** Tiene en cuenta todas las pérdidas de la bomba y su valor es:

$$N_t = P / P_a \quad (\text{Ec. 9})$$

2.6 VELOCIDAD ESPECIFICA

La velocidad específica es un dato de gran utilidad en la caracterización de la bomba, independientemente de su tamaño y velocidad de funcionamiento.

En unidades métricas la velocidad específica puede ser calculada por la siguiente expresión:

$$N_s = 3.65n \sqrt{Q/H^{3/4}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

Q = caudal m³/s.

H = altura manométrica en m.

n = velocidad angular en rpm⁷.

2.7 ALTURA (H):

"Significa la distancia vertical existente entre una superficie libre de agua y una cota de referencia. En los sistemas de bombeo, el término altura se refiere tanto a una bomba como al conjunto de tuberías. La altura de una bomba es la distancia a la que puede elevar un líquido y se mide en metros de columna de líquido bombeado (m.c.l). Se deben diferenciar diversas alturas"⁸.

2.7.1 Altura geométrica (H_g). Es la altura vertical comprendida entre el nivel del agua o líquido a elevar hasta el punto más alto de la tubería de impulsión o

⁷ JIMENEZ Y MOLINA, Op. cit p. 9-13.

⁸ LOPEZ, Ricardo. Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. Medellín: Escuela Colombiana de ingeniería, 2000 P. 128-130.

descarga. Viene dada en metros. Esta altura se divide en dos: altura de succión y altura de impulsión.

$$H_g = H_s + H_d. \quad (\text{Ec. 11})$$

- **Altura de Succión (H_s).** Comprende la distancia desde el nivel del líquido hasta el eje de la bomba. En la práctica no puede ser superior a 8 metros.
- **Altura de Impulsión (H_d).** Se mide desde el eje de la bomba hasta el punto al que va a subir el agua. Se expresa en metros.

2.7.2 Altura manométrica (H_m). Es la suma de la altura geométrica más las pérdidas de carga, o sea, la presión efectiva que ha de vencer la bomba para elevar el agua o líquido desde su nivel más bajo hasta el punto de elevación más alto, Viene dada en metros de columna de agua (m.c.a).

$$H_m = H_g + P_c. \quad (\text{Ec. 12})$$

2.8 PERDIDA DE CARGA (P_c):

Son las fuerzas que se oponen al avance del agua en las tuberías, producidas por rozamiento interno debido a rugosidad, diámetro, longitud y velocidad con que circula el agua. También influyen los accesorios, como codos, llaves de paso, válvulas. La pérdida de carga se indica en metros de elevación.

2.9 CURVA CARACTERISTICA:

Una bomba no tiene un único punto de funcionamiento, sino una infinidad de ellos. La curva que une todos los puntos de funcionamiento posibles de una bomba,

acoplada a un motor concreto, recibe el nombre de curva característica o curvas de la bomba.

2.10 ENERGIA CINETICA:

Las bombas centrífugas están clasificadas como bombas de energía cinética, entendiendo por energía cinética a la energía que posee un cuerpo que lleva velocidad, o bien, la energía de un cuerpo en movimiento.

2.11 NPSH= ALTURA NETA POSITIVA DE SUCCIÓN

Es la diferencia entre la presión del líquido a bombear referida al eje del impulsor y la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo, referida a metros. Puede interpretarse como la altura de equilibrio de presión que nos dice cuántos metros debe tener la altura de presión en la línea de succión por encima de la presión de vapor del líquido para que no pueda producirse la vaporización del mismo, asegurándose así el perfecto trabajo de la bomba. Se debe distinguir⁹.

- **NPSH Disponible.** Depende del conjunto de la instalación elegida para la bomba y es una particularidad independiente del tipo de bomba. Se define como la energía que tiene un líquido en la toma de succión de la bomba, por encima de la energía del líquido, debida a su presión de vapor.
- **NPSH Requerido.** Es aquella energía necesaria para llenar la parte de succión y vencer las pérdidas por rozamiento y el aumento de velocidad desde la conexión de succión hasta el punto en que se añade más energía. Es un

⁹ PUENTES LEAL, Gerardo. Principios básicos sobre bombas. San Juan de Pasto: Puentes leal, 1998 P. 10-11.

dato básico peculiar de cada tipo de bomba, variable según modelo, tamaño y condiciones de servicio, que se determina por prueba o cálculo, siendo un dato a facilitar por el fabricante el cual ha obtenido a través de ensayos.

2.12 CAVITACION

Ruido que se oye en el interior de la bomba causado por la explosión de las burbujas de vapor cuando la bomba opera con una succión excesiva. En general, la cavitación, indica un NPSH disponible insuficiente.

2.13 NUMERO DE REVOLUCIONES

En las bombas centrífugas la relación de caudal suministrado a la altura de impulsión hace que el rodete tenga una forma determinada. Esta relación se expresa por el número específico de revoluciones (velocidad específica).

2.14 POTENCIA ABSORBIDA

Es la potencia en el eje de la bomba y equivale a la potencia hidráulica más la potencia consumida en compensar los distintos tipos de pérdidas que se ocasionan en la bomba. Por lo tanto, es mayor que la potencia hidráulica.

2.15 POTENCIA ABSORBIDA POR EL MOTOR

Es mayor que la potencia absorbida por la bomba, pues hay que añadirle las pérdidas internas del motor eléctrico.

2.16 RENDIMIENTO MECANICO

Es el rendimiento de la bomba, equivale al cociente de dividir la potencia hidráulica y la potencia absorbida. Se expresa en porcentajes y es siempre menor que la unidad, (o sea, menor que el 100%).

2.17 PRESION

"Cuando se realizan los cálculos que implican la presión de un fluido, se debe hacer la medición en relación con alguna presión de referencia. Normalmente, la presión de referencia es la presión de la atmósfera, y la presión resultante que se mide se conoce como presión manométrica. La presión que se mide en relación con el vacío se conoce como presión absoluta"¹⁰.

2.17.1 Relación entre presión y elevación. Existen muchas situaciones en las que es importante saber exactamente de qué manera varía la presión con un cambio de profundidad o elevación.

El término elevación significa la distancia vertical a partir de algún nivel de referencia hasta el punto de interés y se llama z . Al cambio en la elevación entre dos puntos se denomina h . La elevación se medirá siempre positivamente en la dirección hacia arriba. Puesto que los cálculos en mecánica de fluidos, por lo general, consideran diferencias en elevación, es aconsejable seleccionar el punto de interés más bajo de un problema como el nivel de referencia, con el fin de eliminar el uso de valores negativos de z . El cambio de presión en un líquido homogéneo en reposo debido al cambio en elevación se puede calcular a partir de:

$$\Delta p = \gamma h \quad (\text{Ec. 13})$$

En donde:

Δp = cambio de presión

γ = Peso específico del líquido.

h = cambio de elevación.

Una disminución en la elevación ocasiona un aumento en la presión. Un aumento en la elevación ocasiona una disminución en la presión.

El manómetro es un aparato para la medición de presión. Utiliza la relación existente entre un cambio de presión y un cambio de elevación en un fluido estático. Los más usuales para la medición de presión son:

- **Tubo – U.** Es el tipo de manómetro más sencillo. Un extremo del tubo-U está conectado a la presión que se va a medir, mientras que el otro se deja abierto a la atmósfera. El tubo contiene líquido conocido como fluido manométrico, que no se mezcla con el fluido cuya presión se va a determinar. Los fluidos manométricos típicos son agua, mercurio y aceites ligeros coloreados. Bajo la acción de la presión que se va a determinar, el fluido manométrico es desplazado de su posición normal. Puesto que los fluidos dentro del manómetro están en reposo la ecuación $\Delta p = \gamma h$ puede utilizarse para escribir expresiones para los cambios de presión que se presentan a través del manómetro. Estas expresiones pueden combinarse y resolverse algebraicamente para la presión deseada.
- **Manómetro tipo Bourdon.** La presión que se va a medir se aplica a la parte interior de un tubo aplanado que, normalmente, tiene la forma de un círculo. La presión aumentada en el interior del tubo ocasiona que éste se enderece un

¹⁰ MOTT, Op. cit., p. 43, 46, 60.

poco. El movimiento del extremo del tubo es transmitido a través de una ligadura que, a su vez, hace que un indicador gire. La escala del medidor, normalmente, indica cero cuando el medidor está abierto a la presión atmosférica de manera directa.

2.18 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL TEOREMA DE BERNOULLI

El teorema de Bernoulli no es otra cosa que el principio de la conservación de la energía. Puede ser enunciado así: "A lo largo de cualquier línea de corriente la suma de las alturas cinéticas, piezométricas y estáticas es constante"¹¹. Se expresa:

$$(V_1^2 / 2g) + (P_1 / \gamma) + Z_1 = (V_2^2 / 2g) + (P_2 / \gamma) + Z_2 = \text{constante. (Ec. 14)}$$

Cada uno de los términos de la ecuación 14 representa una forma de energía que se especifica así.

$V^2 / 2g$ = Energía cinética.

P / γ = Energía de presión o piezométrica.

Z = Energía de posición o potencial.

Es importante anotar que cada uno de estos términos puede ser expresado en metros (m), constituyendo lo que se denomina carga.

$V^2 / 2g$ = Carga de velocidad o dinámica.

P / γ = Carga de presión.

Z = Carga geométrica o de posición.

¹¹ AZEVEDO NETTO, J.M. Y ACOSTA ALVAREZ, Guillermo. Manual de hidráulica. México: Ed. Harla, 1976 P.45-50.

Se debe tener en cuenta la fricción ya que a consecuencia de estas fuerzas, el flujo se mueve con una pérdida de energía o pérdida de carga. Por eso se introduce en la ecuación de Bernoulli el término correctivo h_f (pérdida de carga), quedando la ecuación de la siguiente manera.

$$(V_1^2 / 2g) + (P_1 / \gamma) + Z_1 = (V_2^2 / 2g) + (P_2 / \gamma) + Z_2 + h_f \quad (\text{Ec. 15})$$

3. DESCRIPCION DEL BANCO DE PRUEBAS

Para la construcción e instalación del banco de pruebas para determinar las curvas características de una bomba centrífuga se elaboraron varios diseños para escoger el más adecuado el cual cumpla con los parámetros referidos en la teoría de bombas centrífugas. (Ver figura 7)

Figura 7. Banco de pruebas para determinar las curvas características de una Bomba centrífuga.



3.1 ELEMENTOS Y MATERIALES

Para la construcción y montaje del banco de pruebas se utilizaron los siguientes elementos y materiales.

- Una bomba centrífuga de 1 HP, 3645 rpm.
- Una válvula de compuerta de diámetro 2 pulgadas.
- Un tanque de carga y descarga.
- Un vertedero para la medición del flujo.
- Cámara de aquietamiento.
- Cuatro codos de diámetro 2 pulgadas en PVC.
- Una universal de diámetro 1 $\frac{1}{2}$ de pulgada en PVC.
- Una universal de diámetro 2 pulgadas en PVC.
- Tubería PVC.
- Sistema digital para medir voltaje, amperaje y las rpm.
- Un manómetro de mercurio para medir la presión en la succión.
- Un manómetro de glicerina (0 – 60 PSI).
- Estructura de soporte para todo el sistema.
- Otros accesorios en PVC.

3.2 CARACTERISTICAS BASICAS DEL BANCO DE PRUEBAS

El banco de pruebas presentará una bomba centrífuga de 1 HP, marca IHM motor WEG de 3645 rpm con diámetro de entrada y salida de 1 $\frac{1}{2}$ pulgada, con la cual se realiza el estudio de operación individual a través de manipulación de válvulas y accesorios. (Ver figura 8).

Figura 8. Bomba centrífuga.



Para el suministro de agua se instalará un tanque de carga y descarga elaborado en lámina calibre 20, cuya capacidad en volumen es de 202500 cm^3 , igual a 202,5 litros. Este tanque permite que el banco de pruebas funcione como un circuito cerrado. Además contará con un sistema de desagües para realizar su mantenimiento.(Ver figura 9).

El tanque de carga y descarga estará provisto de un vertedero rectangular construido en acrílico, el cual está sujeto por medio de tornillos a un soporte en lámina, esto para facilitar su calibración que se realiza a través de aforos de caudal por medio del sistema para determinar el estudio de flujo en canales y patronamiento de vertederos. (Ver figura 10)

Figura 9. Tanque de carga y descarga.

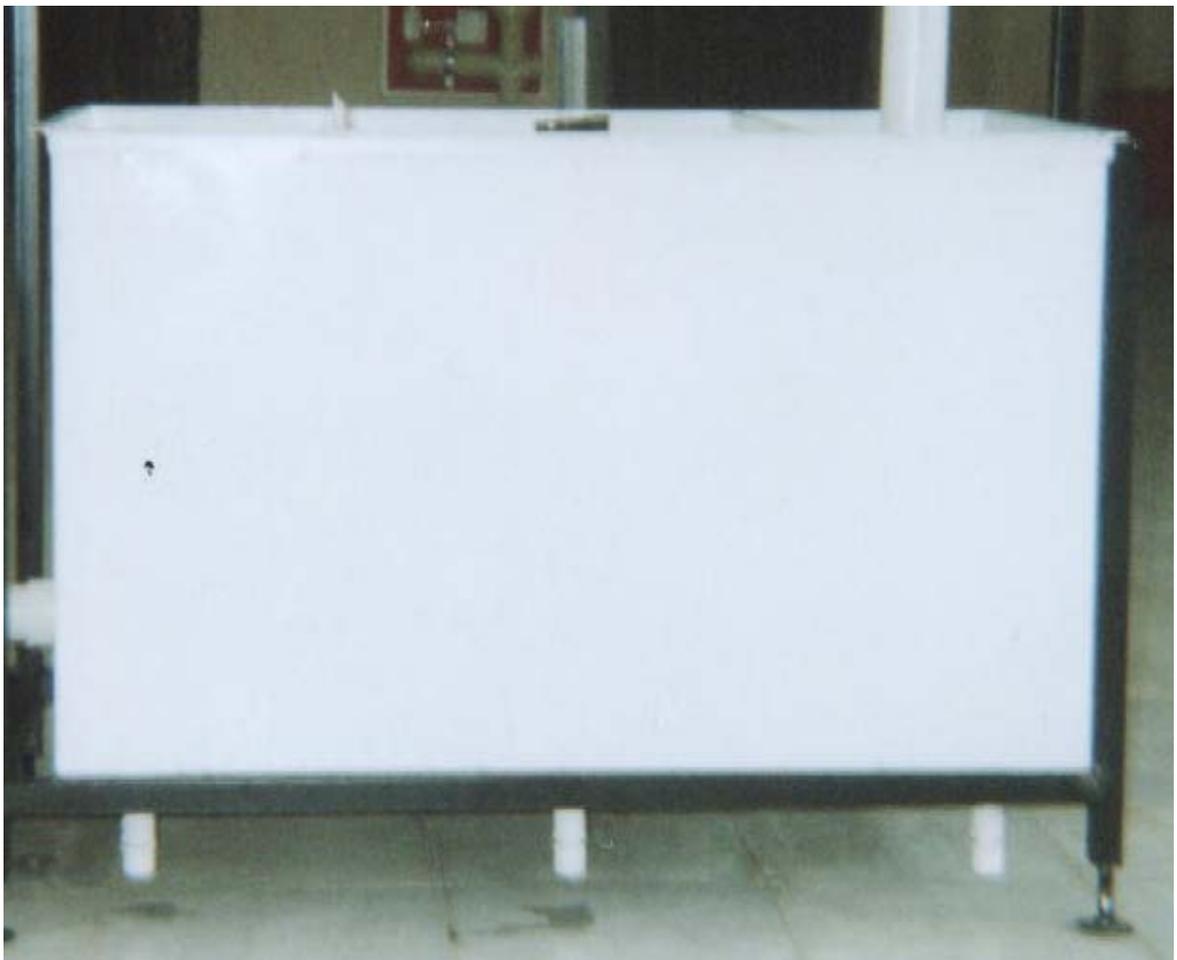


Figura 10. Vertedero



Para la regulación del flujo y mantener el nivel de aguas constante se construyó en el tanque una cámara de aquietamiento elaborada en lámina calibre 20. (Ver figura 11).

Con el propósito de disipar la energía producida por la descarga del fluido se instaló en el tanque un dissipador de energía elaborado en tubo PVC sanitario de diámetro 4 pulgadas al cual se le realizaron varias perforaciones de diámetro $\frac{1}{2}$ pulgada. Dentro de éste se colocaron piedras de río para conseguir dicho objetivo.

Figura 11. Cámara de aquietamiento.



La regulación del caudal se realizará a través de una válvula de compuerta instalada en la tubería de descarga a 5 veces el diámetro en un tramo recto, la cual tiene como finalidad servir de reguladora del caudal cuando se requiera. (Ver figura 12).

El banco de pruebas tendrá un sistema de medición de presión. En la tubería de succión e impulsión se instalaron dos manómetros para medir las presiones correspondientes. En la succión se conectó un manómetro tipo U de mercurio y en la descarga un manómetro de glicerina tipo Bourdon que está ubicado a 5 veces el diámetro aguas arriba y aguas abajo. (ver figuras 13 y 14).

Figura 12. Válvula de compuerta.



Para medir el voltaje, amperaje y las revoluciones en la unidad de tiempo (RPM), se contará con un sistema digital, el cual consta de tres multímetros y una tarjeta electrónica, que con un sistema de circuitos permite medir la corriente y variar las revoluciones de la bomba para hacer diferentes ensayos, (Ver figuras 15). Para medir las revoluciones se instaló en la bomba un disco que permite detectar

dichas revoluciones por medio de un sensor infrarrojo conectado a la tarjeta electrónica que a su vez registra las lecturas en el multímetro.

Figura 13. Manómetro tipo U de mercurio.

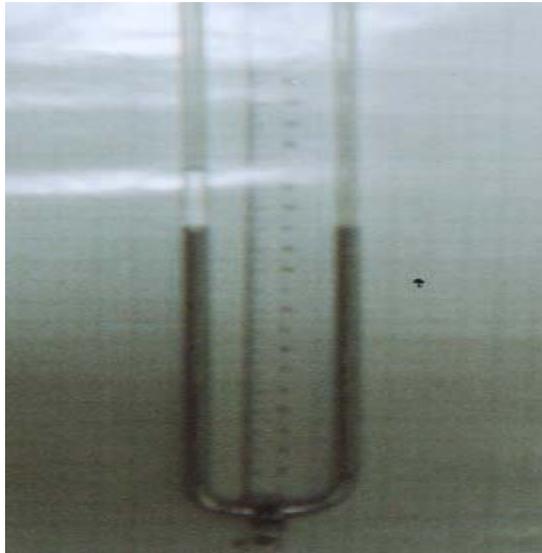
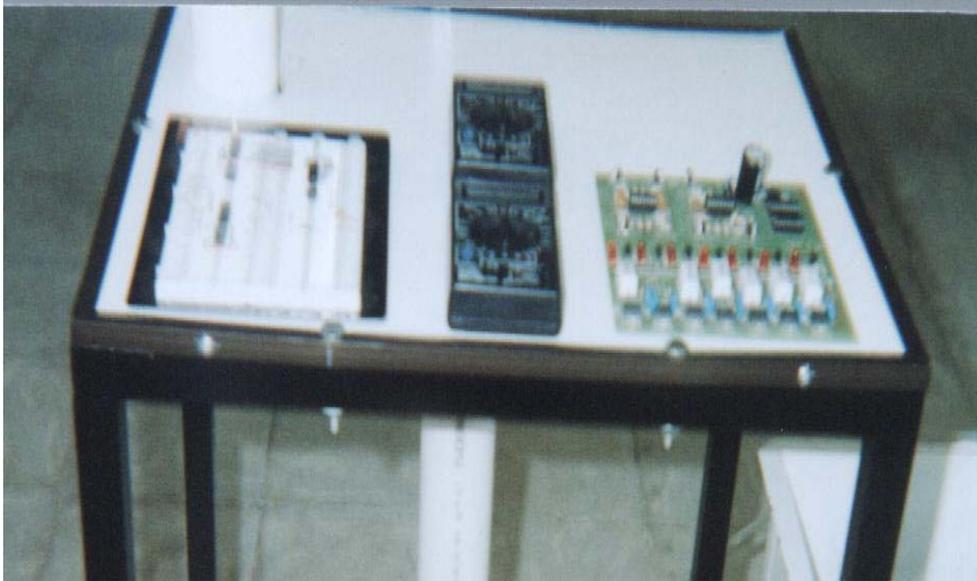


Figura 14. Manómetro de glicerina tipo Bourdon

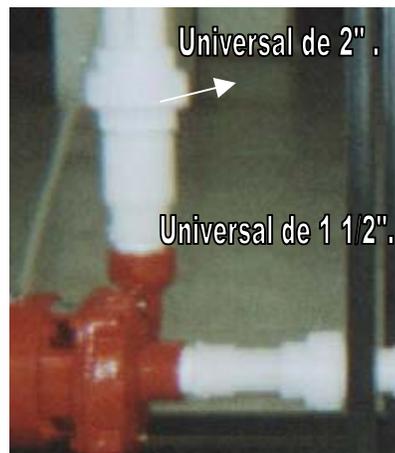


Figura 15. Elementos del sistema digital



Además de lo anterior el banco de pruebas consta de accesorios y tubería para un correcto funcionamiento. Lleva en la tubería de succión y descarga unas universales que son importantes porque se acopla o desacopla rápidamente la bomba en caso de requerirlo, (Ver figura 16).

Figura 16. Universales



4. CALCULOS PRINCIPALES DEL BANCO DE PRUEBAS

4.1 CALCULO DE DIAMETROS

Los diámetros de la tubería de succión y de descarga se calcularon con base en el caudal máximo de la bomba que es de 2,52 lps equivalente a 40 gpm.

4.1.1 Diámetro de la tubería de succión

Corresponde al tramo que va desde el tanque de carga y descarga hasta la bomba centrífuga de 1 HP. Para el cálculo del diámetro se utiliza el caudal máximo de la bomba y una velocidad de diseño para tuberías de succión, la cual debe cumplir las especificaciones dadas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Velocidad máxima en tuberías de succión

DIAMETRO TUBERIA DE SUCCION (mm)	VELOCIDAD MAXIMA (m/s)
50	0,75
75	1,00
100	1,30
150	1,45
200	1,60
250	1,60
300	1,70
> 400	1,80

FUENTE: Ministerio de desarrollo económico. Título B, RAS 2000.

La velocidad mínima en tuberías de succión será de 0,45 m/s.

Aplicando la ecuación de continuidad $Q = V * A$, se tiene:

$$A = Q / V \quad (\text{Ec. 16})$$

$$A = 0,00252 \text{ m}^3/\text{s} / 1,80 \text{ m/s}$$

$$A = 14,00 \text{ cm}^3$$

$$A = \pi * D^2 / 4$$

$$D = \sqrt{(4 * A/\pi)}$$

$$D = \sqrt{(4 * 14,00/\pi)}$$

$$D = 4,22 \text{ cm}$$

$$D = 4,22\text{cm} * (2,54\text{pulgadas} / 1\text{cm})$$

$$D = 1,66 \text{ pulgadas.}$$

De lo anterior se puede decir que el diámetro de la tubería de succión es de **1 ½ pulgada**.

4.1.2 Diámetro de la tubería de impulsión o descarga

Corresponde al tramo que va desde la bomba hasta el tanque de carga y descarga.

Para tuberías de impulsión la velocidad debe estar entre 1 m/s y 3 m/s, valores por fuera del rango deben ser justificados.

$$A = 0,00252 \text{ m}^3/\text{s} / 2 \text{ m/s}$$

$$A = 12,6 \text{ cm}^2$$

$$A = \pi * D^2 / 4$$

$$D = \sqrt{(4 * A/\pi)}$$

$$D = \sqrt{(4 * 12,6/\pi)}$$

D = 4,22 cm

D = 4,01cm * (2,54pulgadas / 1cm)

D = 1,58 pulgadas.

Según las RAS 2000 el diámetro de la tubería de descarga debe ser mayor o igual que el diámetro de la tubería de succión, por lo tanto se tiene que el diámetro en este tramo es de **2 pulgadas**.

4.2 CALCULO DE PERDIDAS

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción. Además existen las pérdidas menores debido a la pérdida de presión en accesorios.

4.2.1 Pérdidas de fricción

Para que un fluido se mueva dentro de una tubería hace falta, como ya se ha mencionado, que exista una presión que le obligue a ello y que compense los rozamientos que se producen cuando el fluido se traslada por su interior y, al mismo tiempo mantenga la velocidad de circulación. Cuando el agua transita a lo largo de un conducto pasa tocando sus paredes. Lo que supone una pérdida de energía del agua que se manifiesta en una disminución de la presión total.

Para el cálculo de estas pérdidas se va a utilizar la ecuación de WILLIAMS & HAZEN:

$$h_f = (0.2083 * (100/C)^{1.85}) * (Q^{1.85}) / (D^{4.866}) * L \quad (\text{Ec.17})$$

En la que:

h_f = Pérdida de presión en m / 100 m.

Q = Flujo en galones por minuto(m).

D = Diámetro interior de la tubería. (pulgadas).

C = Factor de fricción constante.

El factor de fricción para tubería de PVC es de 150.

- **Pérdidas por fricción en la tubería de succión.**

Para este tramo se tiene una longitud de tubería de 0,22 m, un diámetro interno de 1,688 pulgadas para una tubería de 1 ½ pulgada, PVC PAVCO RDE 21 y un caudal de 2,52 lps equivalente a 40 gpm, por lo tanto la pérdida es:

$$h_f = (0,2083 * (100/150)^{1,85}) * (40^{1,85}) / (1,688^{4,866}) * L$$

$$h_f = (0,0985 * (40^{1,85}) / (1,688^{4,866})) * L$$

$$h_f = (7,052 \text{ m} / 100 \text{ m}) * 0,22 \text{ m}$$

$$h_f = \mathbf{0,0156 \text{ m.}}$$

- **Pérdidas por fricción en la tubería de impulsión o descarga.**

Para este tramo se tiene una longitud de tubería de 5,014 m, un diámetro interno de 2,109 pulgadas para una tubería de 2 pulgadas, PVC PLEXIN RDE 21 y un caudal de 2,52 lps equivalente a 40 gpm, por lo tanto la pérdida es:

$$h_f = (0,2083 * (100/150)^{1,85}) * (40^{1,85}) / (2,109^{4,866}) * L$$

$$h_f = (0,0985 * (40^{1,85}) / (2,109^{4,866})) * L$$

$$h_f = (2,4004 \text{ m} / 100 \text{ m}) * 5,014 \text{ m}$$

$$h_f = 0,120 \text{ m.}$$

Por lo tanto las pérdidas totales por fricción en el banco de pruebas son:

$$h_f = 0,0156 \text{ m} + 0,120 \text{ m}$$

$$h_f = 0,1356 \text{ m.}$$

4.2.2 Pérdidas menores

Las pérdidas menores ocurren cuando hay un cambio en la sección cruzada de la trayectoria de flujo o en la dirección de flujo, o cuando la trayectoria de flujo se encuentra obstruida, como sucede con una válvula.

Las pérdidas de energía son proporcionales a la cabeza de velocidad del agua al fluir ésta alrededor de un codo, a través de una dilatación o contracción de la sección de flujo, o a través de una válvula. Los valores de pérdidas de energía generalmente se reportan en términos de un coeficiente de resistencia, K, de la siguiente manera:

$$h_L = K * (v^2/2g) \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

h_L = Pérdida menor (m).

V = Velocidad media del agua en la tubería en la vecindad donde se
Presenta la pérdida menor. (m/seg).

K = Coeficiente de resistencia. (sin dimensiones).

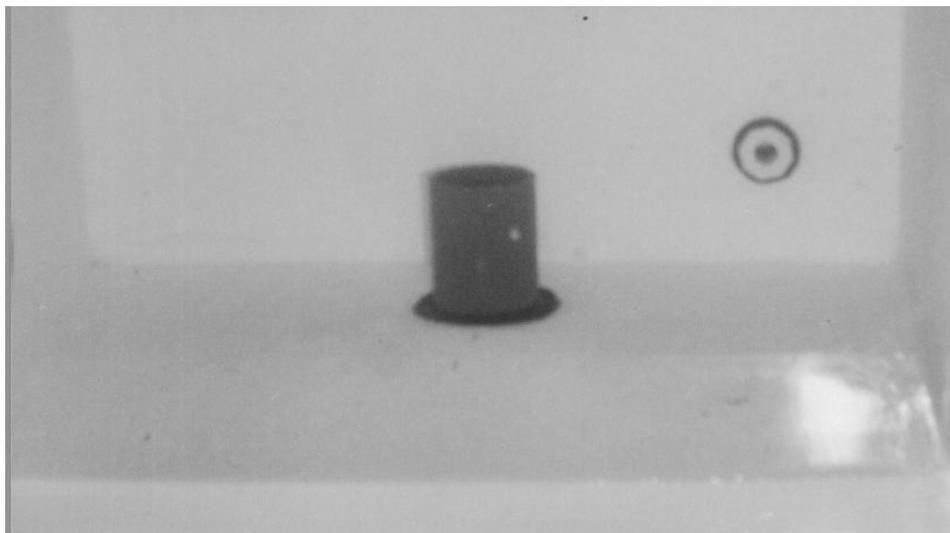
g = Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

La pérdida de presión en accesorios puede averiguarse mediante ábacos o tablas conforme al tipo de accesorios y sus dimensiones, expresándose la pérdida de carga en metros de tubería recta equivalente.

- **Pérdidas menores en la succión.**

En la succión se presenta una pérdida menor por entrada del tanque a la tubería, la cual es una pérdida por conducto de proyección hacia adentro o de tipo borda, (Ver figura 17), cuyo valor del coeficiente de resistencia $K = 1,0$ (Ver cuadro 2).

Figura 17. Entrada tipo borda



Cuadro 2. Coeficientes de resistencia por entrada

TIPO DE ENTRADA	COEFICIENTE DE RESISTENCIA K
Tipo borda	1,0
Entrada de borde cuadrado	0,5
Entrada achaflanada	0,25
Entrada bien redondeada	0,04

$$h_L = K * (v^2/2g)$$

$$h_L = 1.0 * ((2.21\text{m/s})^2/(2*9.81\text{m/s}^2))$$

$$h_{Ls} = 0.249 \text{ m.}$$

- **Pérdidas menores en la impulsión**

- Ampliación brusca de 1 ½ a 2 pulgadas, coeficiente de resistencia K =0,24 (ver cuadro 3).

Para un caudal de 2,52 lps y una velocidad de 2,21 m/s la pérdida es:

$$h_L = K * (v^2/2g)$$

$$h_L = 0,24 * ((2,21\text{m/s})^2/(2*9,81\text{m/s}^2))$$

$$h_L = 0,0598 \text{ m.}$$

Cuadro 3. Coeficiente de resistencia para ampliación brusca

D ₂ /D ₁	Velocidad V ₁			
	0,6 m/s	1,2 m/s	3 m/s	4,5 m/s
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,20	0,11	0,10	0,09	0,09
1,40	0,26	0,25	0,23	0,22
1,60	0,40	0,38	0,65	0,34
1,80	0,51	0,48	0,45	0,43
2,00	0,60	0,56	0,52	0,51
2,50	0,74	0,70	0,65	0,63
3,00	0,83	0,78	0,73	0,70
4,00	0,92	0,87	0,80	0,78
5,00	0,96	0,91	0,84	0,82
10,00	1,00	0,96	0,89	0,86

FUENTE: MOTT, Robert. Mecánica de fluidos aplicada. México: Prentice Hall, 1996.

- 4 codos de 90° de diámetro 2 pulgadas en PVC, aplicando el método de cálculo de pérdidas por longitud equivalente se tiene:

$$L_e = 1,7\text{m (Ver cuadro 4)}$$

$$j = 2,4004 \text{ m} / 100 \text{ m (ver sección 4.2.1)}$$

$$h_L = j * L_e$$

$$h_L = (2,4004 \text{ m} / 100 \text{ m}) * (1,7\text{m} * 4)$$

$$\mathbf{h_L = 0,163 \text{ m.}}$$

- Válvula de compuerta abierta diámetro 2 pulgadas

$$L_e = 0,4 \text{ m. (Ver cuadro 4)}$$

$$h_L = (2,4004 \text{ m} / 100 \text{ m}) * 0,4\text{m}$$

$$\mathbf{h_L = 0,0096\text{m.}}$$

Por lo tanto la pérdida total por accesorios es:

$$h_L = 0,249 \text{ m} + 0,0598 \text{ m} + 0,163 \text{ m} + 0,0096 \text{ m}$$

$$\mathbf{h_L = 0,481 \text{ m.}}$$

La pérdida total por fricción y accesorios es:

$$h_t = h_f + h_L$$

$$h_t = 0,1356 \text{ m} + 0,481 \text{ m}$$

$$\mathbf{h_t = 0,617 \text{ m.}}$$

Cuadro 4. Longitudes equivalentes en tuberías

MM	PUL	RADIO			V. DE COMPUERTA, ABIERTA	V. TIPO GLOBO ABIERTA	V. DE ÁNGULO ABIERTA	TE PASO DIRECTO	TE SALIDA LATERAL	TE SALIDA BILATERAL	V. DE PIE	SALIDA DE TUBERÍA	V. DE RETENCIÓN TIPO LIVIANA	V. DE RETENCIÓN TIPO PESADO
		LARGO	MEDIO	CORTO										
13	1/2	0.3	0.4	0.5	0.2	4.9	2.6	0.3	1	1	3.6	0.4	1.1	1.6
19	3/4	0.4	0.6	0.7	0.3	6.7	3.6	0.4	1.4	1.4	5.6	0.5	1.6	2.4
25	1	0.5	0.7	0.8	0.4	8.2	4.6	0.5	1.7	1.7	7.3	0.7	2.1	3.2
32	1-1/4	0.7	0.9	1.1	0.5	11.3	5.6	0.7	2.3	2.3	10	0.9	2.7	4
38	1-1/2	0.9	1.1	1.3	0.6	13.4	6.7	0.9	2.8	2.8	11.6	1	3.2	4.8
50	2	1.1	1.4	1.7	0.8	17.4	8.5	1.1	3.5	3.5	14	1.5	4.2	6.4
63	2-1/2	1.3	1.7	2	0.9	21	10	1.3	4.3	4.3	17	1.9	6.2	8.1
75	3	1.6	2.1	2.5	1.2	26	13	1.6	5.2	5.2	20	2.2	6.3	9.7
100	4	2.1	2.8	3.4	1.5	34	17	2.1	6.7	6.7	23	3.2	8.4	12.9
125	5	2.7	3.7	4.2	1.9	43	21	2.7	8.4	8.4	30	4	10.4	16.1
150	6	3.4	4.3	4.9	2.3	51	26	3.4	10	10	39	5	12.5	19.3
200	8	4.3	5.5	6.4	3	67	34	4.3	13	13	52	6	16	25
250	10	5.5	6.7	7.9	3.8	86	43	5.5	16	16	65	7	20	32
300	12	6.1	7.9	9.5	4.6	102	51	6.1	19	19	78	9	24	38
350	14	7.3	9.5	11	5.3	120	60	7.5	22	22	900	11	28	45

FUENTE: SALAZAR, Roberto. Acueductos. San Juan de Pasto:

Universidad de

Nariño, 1998. Anexo 3.

4.3 DISEÑO VERTEDERO

Como el modelo presenta un tanque para suministro de agua y que será utilizado como tanque de descarga, es necesario medir el caudal por medio de un vertedero.

4.3.1 Vertedero.

"Los vertederos pueden ser definidos como simples aberturas, sobre los cuales un líquido fluye. Los vertederos son por así decirlo orificios sin el borde superior, son utilizados intensa y satisfactoriamente en la medición de caudal en pequeños cursos de agua y conductos libres, así como en el control del flujo en galerías y canales"¹².

- **Partes de un vertedero.**

En la figura 18 se hace una breve descripción de las partes que componen un vertedero.

H = carga del vertedero

L = longitud de la cresta

B = ancho del canal de acceso

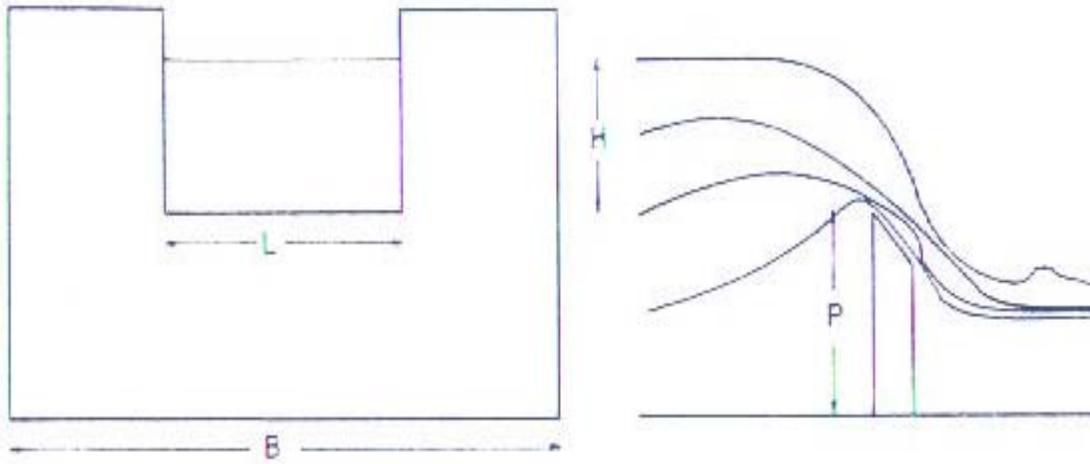
P = altura comprendida desde la cresta hasta el fondo del vertedero

- **Clasificación de los vertederos.**

Los vertederos tienen diferentes formas y disposiciones, siendo muchos los factores que pueden servir para su clasificación.

¹² AZEVEDO NETTO, J.M. Y ACOSTA ALVAREZ, Guillermo. Manual de hidráulica. México: Harla, 1976. P. 76.

Figura 18. Esquema general del vertedero



L = Longitud de la cresta

B = Ancho

H = Carga

P = Profundidad

1. Forma

- Simples: rectangulares, triangulares y trapezoidales.
- Compuestos: secciones combinadas.

2. Altura relativa del umbral

- vertederos completos o libres.
- vertederos incompletos o ahogados.

3. Espesor de la pared

- Vertederos de pared delgada.
- Vertederos de pared gruesa.

4. Longitud de la cresta

- Vertederos sin contracciones laterales.
- Veretederos con contracciones laterales.

4.3.2 Vertederos rectangulares

Para esta forma de vertedor la ecuación es:

$$X = L / 2$$

Donde, L es la longitud de la cresta.

La ecuación de gasto para vertederos rectangulares es:

$$Q = CLH^m$$

$$C = (2/3) \sqrt{(2g)} \mu$$

μ : coeficiente de gasto.

Según la sociedad de ingenieros y arquitectos Suizos se debe cumplir con las siguientes condiciones para determinar las dimensiones de un vertedero rectangular con contracciones laterales.

- $0,025 \leq H \leq 0,80$
- $L \leq 0,3B$.
- $H / P \leq 1$
- $P \geq 0,30m$

4.3.3 Dimensionamiento del vertedero rectangular.

Dadas las condiciones que presenta el banco de pruebas se miró la necesidad de utilizar un vertedero rectangular con las siguientes características:

$$L = 0,08m$$

$$B = 0,45m$$

- Cálculo de H del vertedero:

Para realizar la curva de patronamiento se necesita como mínimo 20 puntos, con una diferencia de 0,005 m entre cada una de las lecturas, entonces tenemos un H de:

$$H = H_{min} + 19 \cdot 0,005m$$

$$H = 0,05\text{m} + 19 \cdot 0,005\text{m}$$

$$H = 0,145\text{ m} \text{ aproximadamente } \mathbf{H = 0,15\text{ m.}}$$

$$- 0,025\text{ m} \leq H \leq 0,80\text{ m.}$$

$$0,025\text{m} \leq 0,15\text{m} \leq 0,80\text{m} \quad \mathbf{S\acute{ı}\text{ cumple.}}$$

$$- P \geq 0,30\text{m}$$

$$0,30\text{m} \geq 0,30\text{m} \quad \mathbf{S\acute{ı}\text{ cumple.}}$$

$$- L \leq 0,3B.$$

$$L \leq 0,3 \cdot 0,45\text{m}$$

$$L \leq 0,135\text{m} \quad \mathbf{S\acute{ı}\text{ cumple.}}$$

$$- H / P \leq 1$$

$$0,15 / 0,30 \leq 1$$

$$0,5 \leq 1 \quad \mathbf{S\acute{ı}\text{ cumple.}}$$

Con la verificaci3n de las condiciones a cumplir para el dise1o de vertederos se procede a calcular el hmin as1:

- Altura m1nima del vertedero.

$$h_{\text{min}} = P + H + \text{francobordo.}$$

$$h_{\text{min}} = 0,30\text{m} + 0,15\text{m} + 0,05\text{m}$$

$$\mathbf{h_{\text{min}} = 0,50\text{m.}}$$

El coeficiente C es de tipo experimental que depende de la altura de la lámina de agua. Por lo cual para calcular los caudales a diferentes alturas se hizo una curva de calibración mediante aforos volumetricos y alturas de H , empleando el sistema de flujo en canales y patronamiento de vertederos, (Ver figura 19, 20 y 21), encontrando los siguientes datos (Ver cuadro 5).

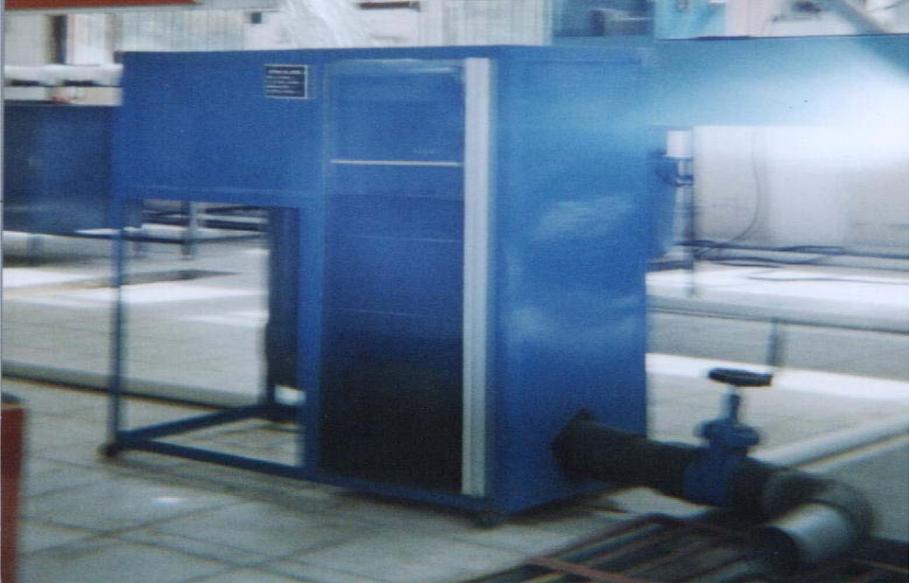
Figura 19. Sistema utilizado para la medición del flujo y patronamiento de vertederos



Figura 20. Patronamiento del vertedero rectangular



Figura 21. Determinación del volumen en el patronamiento del vertedero



Cuadro 5. Datos encontrados para realizar la calibración del vertedero

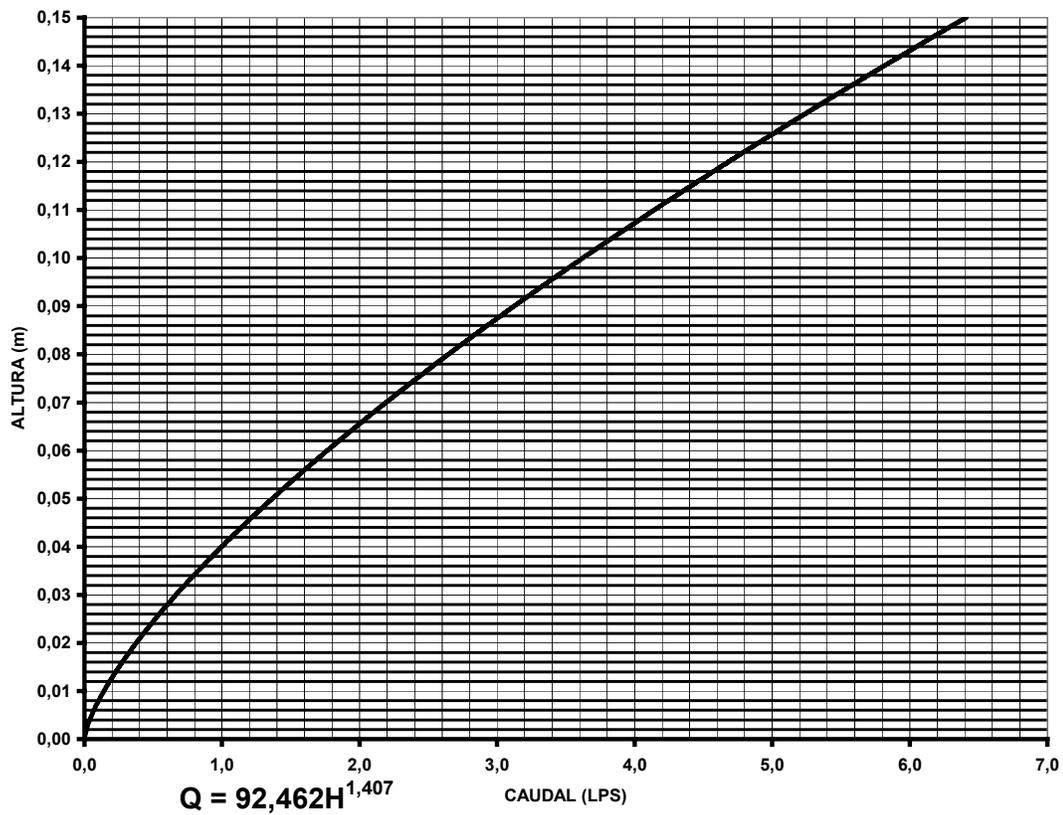
AFORO No	H (m)	Ta (seg)	Ta promedio (seg)	Qa (lt/seg)
1	0,073	9,41	9,51	2,49
		9,59		
		9,47		
		9,59		
		9,49		
2	0,070	10,75	10,64	2,23
		10,74		
		10,35		
		10,79		
		10,59		
3	0,065	11,94	11,77	2,01
		11,93		
		11,75		
		11,69		
4	0,066	12,25	12,06	1,97
		12,10		
		12,16		
		12,11		
		11,66		
5	0,062	12,35	12,43	1,91
		12,97		
		12,10		
		12,34		
		12,41		
6	0,059	12,99	13,27	1,79
		13,27		
		13,38		
		13,42		
		13,31		
7	0,058	14,78	14,64	1,62
		14,37		
		14,67		
		14,79		
		14,59		
8	0,055	14,74	14,93	1,59
		14,98		
		15,08		
		14,71		

AFORO	H	Ta	Ta promedio	Qa
No	(m)	(seg)	(seg)	(lt/seg)
9	0,054	15,70	15,52	1,53
		15,06		
		15,42		
		15,62		
		15,78		
10	0,052	17,93	18,33	1,29
		18,74		
		18,27		
		18,26		
		18,45		
11	0,049	19,40	18,84	1,26
		18,34		
		18,91		
		18,76		
		18,80		
12	0,048	19,81	19,76	1,20
		19,88		
		19,72		
		19,21		
		20,17		
13	0,045	20,17	20,35	1,16
		20,39		
		20,34		
		20,26		
14	0,041	22,24	22,40	1,06
		22,43		
		22,27		
		22,38		
		22,69		
15	0,036	26,91	26,84	0,88
		26,83		
		26,83		
		26,57		
		27,07		
16	0,034	29,18	29,10	0,81
		28,91		
		29,49		
		28,84		
		29,10		
17	0,031	31,86	31,89	0,74

AFORO No	H (m)	Ta (seg)	Ta promedio (seg)	Qa (lt/seg)
		31,60		
		32,16		
		31,92		
		31,93		
18	0,029	37,46	37,36	0,63
		37,41		
		37,21		
19	0,026	43,11	43,12	0,55
		42,88		
		43,37		
20	0.019	68,97	69.10	0.34
		69,51		

Con los datos de esta tabla se procede a hacer la curva de calibración (figura 22).

Figura 22. Curva de calibración del vertedero rectangular



De esta curva se sustrae los caudales que se pueden medir en el vertedero rectangular con sus respectivas alturas, (Ver cuadro 6).

Cuadro 6. Regla altura –caudal del vertedero

H (m)	Q (LPS)
0,050	1,366
0,055	1,562
0,060	1,765
0,065	1,976
0,070	2,193
0,075	2,416
0,080	2,646
0,085	2,882
0,090	3,123
0,095	3,370
0,100	3,622
0,105	3,880
0,110	4,142
0,115	4,409
0,120	4,681
0,125	4,958
0,130	5,239
0,135	5,525
0,140	5,815
0,145	6,110
0,150	6,408

El tanque dispone de una regla con la información contenida en el cuadro 6.

4.4 DISEÑO TANQUE DE CARGA Y DESCARGA.

La finalidad de este tanque es la de suministrar el caudal necesario para la alimentación de la bomba, con la menor turbulencia posible, lo cual se logra mediante una cámara de aquietamiento; y como tanque de aforo con la utilización del vertedero.

4.4.1 Dimensionamiento del tanque

Su dimensionamiento se basa en el diseño realizado para el vertedero rectangular.

- **Altura del tanque (ht)**

Este parámetro de diseño se tomó igual a la altura del vertedero, entonces la altura del tanque **ht = 0,50m.**

- **Ancho del tanque (At)**

El ancho del tanque será igual al ancho B del vertedero **At = 0,45m.**

- **Longitud total del tanque (Lt).**

La longitud total del tanque se la determinó por medio de la siguiente expresión.

$$Lt = L1 + L2 + L3 \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

Lt = Longitud total del tanque. (m).

L1 = Longitud para realizar el aquietamiento del flujo. (m).

L2 = Longitud entre la cámara de aquietamiento y el vertedero. (m).

L3 = Longitud del vertedero a la cara interior del tanque. (m).

Para L1 se adoptó una longitud de 0,25m, la cual se considera que es conveniente para realizar el aquietamiento del flujo. **L1 = 0,25m.**

La longitud L2 = 3 - 4 H.

$$L2 = 3 * 0,5$$

$$\mathbf{L2 = 0,45m}$$

Para la longitud L3 se tiene la siguiente expresión:

$$\mathbf{X^n = (k * h^{(n-1)} * Y)^{(1/n)} \quad (\text{Ec. 20})}$$

Donde:

$$n = 1,85$$

$$k = 2,00$$

Por lo tanto se tiene que:

$$L3 = (k * h^{(n-1)} * Y)^{(1/n)}$$

$$L3 = (2 * 0,10^{(1,85-1)} * 0,20)^{(1/1,85)}$$

$$L3 = 0,212m$$

$$\mathbf{L3 = 0,25m.}$$

Como longitud total del tanque se tiene:

$$Lt = 0,25m + 0,45m + 0,25m$$

$$\mathbf{Lt = 0,90m.}$$

4.5 DISEÑO CAMARA DE AQUIETAMIENTO.

La finalidad de la cámara de quietamiento es quietar el flujo en el tanque para disminuir la turbulencia causada por la descarga de la tubería, reduciendo la velocidad del agua.

Para lograr una buena repartición del flujo se adopta un tabique con orificios. El número y tamaño de orificios se calcula para obtener una velocidad de entrada no mayor a 0,30 m/s.

Area de orificios

$$A = Q / V$$

$$A = 0,00252 \text{ m}^3/\text{s} / 0,30 \text{ m/s}$$

$$A = 0,0084 \text{ m}^2$$

Estimando un coeficiente de contracción igual a 0,61, por contracción de la vena líquida se tiene:

$$A. \text{ neta} = A. \text{ chorro} / A. \text{ total} = 0,61$$

Por lo tanto el área de orificios se incrementará de la siguiente manera:

$$A. \text{ real} = 0,0084 \text{ m}^2 / 0,61$$

$$\mathbf{A. \text{ real} = 0,0138 \text{ m}^2}$$

Para hallar el número de orificios, se adopta un diámetro de orificios igual a 1/2 pulgada (1,27cm o 0,0127m).

$$\mathbf{A. \text{ total} = n * \pi * D^2 / 4} \quad \mathbf{(Ec. 21)}$$

$$n = 4 \cdot A / \pi \cdot D^2$$

$$n = 4 \cdot 0,0138 \text{m}^2 / \pi \cdot (0,0127 \text{m})^2$$

$$n = 108,94 \text{ orificios}$$

$$\mathbf{n = 110 \text{ orificios.}}$$

Como son 110 orificios se procede a calcular el área total:

$$A. \text{ total} = n \cdot \pi \cdot D^2 / 4$$

$$A. \text{ total} = 110 \cdot \pi \cdot (0,0127 \text{m})^2 / 4$$

$$\mathbf{A. \text{ total} = 0,0139 \text{ m}^2}$$

Distribución:

Se efectuaron 11 columnas con 10 orificios cada una, con diámetro 1/2 pulgada.

La distribución en las columnas es:

$$\mathbf{n \cdot (a+t) = L} \quad \mathbf{(Ec. 22)}$$

Donde: a = espaciamientos y t = diámetro de orificios.

$$a = L/n - t$$

$$a = 0,45 \text{m} / 11 - 0,0127 \text{m}$$

$$\mathbf{a = 0,028 \text{m.}}$$

$$a + t = 0,028 \text{m} + 0,0127 \text{m}$$

$$\mathbf{a + t = 0,0407 \text{m}}$$

$$(a + t) / 2 = 0,0407 \text{m} / 2$$

$$\mathbf{(a + t) / 2 = 0,0203 \text{m.}}$$

En las filas la distribución es:

$$a = L/n - t$$

$$a = 0,30\text{m}/10 - 0,0127\text{m}$$

$$\mathbf{a = 0,0173\text{m.}}$$

$$a + t = 0,0173\text{m} + 0,0127\text{m}$$

$$\mathbf{a + t = 0,03\text{m.}}$$

$$(a + t) / 2 = 0,03\text{m} / 2$$

$$\mathbf{(a + t) / 2 = 0,015\text{m.}}$$

La distribución de los orificios tanto en columnas como en filas se muestra en la figura 23.

4.6 CÁLCULO DE LA ALTURA GEOMETRICA

Para el cálculo de la altura geométrica se utiliza la siguiente expresión.

$$\mathbf{Hg = Hs + Hd} \quad \mathbf{(Ec. 23)}$$

Donde:

Hg = Altura geométrica.

Hs = Altura de succión.

Hd = Altura de descarga.

$$Hg = 0\text{m} + 2\text{m}$$

$$\mathbf{Hg = 2\text{m}}$$

4.7 CALCULO DE ALTURA MANOMETRICA

La altura manométrica se determina así:

$$H_m = H_g + P_c \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde:

H_m = Altura manométrica.

H_g = Altura geométrica.

P_c = Pérdidas de carga.

$$P_c = (h_s + h_d)$$

$$P_c = (h_{fs} + h_{Ls}) + (h_{fd} + h_{Ld})$$

$$P_c = (0,0156 + 0,249)m + (0,120 + 0,232)m$$

$$P_c = 0,265 \text{ m} + 0,352 \text{ m.}$$

$$P_c = 0,617m$$

Luego:

$$H_m = 2m + 0,617m$$

$$H_m = 2,617m.$$

4.8 CALCULO DEL NPSH NECESARIO PARA LA BOMBA:

4.8.1 NPSH Disponible: Puede calcularse mediante la expresión:

$$\text{NPSH disponible} = (P_a - (H_s + P_s + (V_s^2/2g))) - P_v \quad (\text{Ec. 25})$$

Siendo:

P_a = Presión atmosférica. Está en función de la altura sobre el nivel del mar donde se encuentra la instalación en (m.c.a).

P_v = Presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo, en m.

H_s = Altura geométrica o estática de succión, en metros.

P_s = Pérdidas de carga o dinámica en la succión, en metros.

V_s = Velocidad a la entrada de la bomba, en m/seg.

Al nivel del mar, la altura máxima de succión es de 70 mm Hg equivalente a 10,33 m de agua. Este valor se lo corrige teniendo en cuenta la elevación sobre el nivel del mar a razón de 1,2 m por cada 100 metros de nivel. Como el Laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño esta aproximadamente a 2481 msnm, se tiene:

$$P_a = 10,33 - (1,2 \cdot 2481) / 1000$$

$$P_a = 7,35 \text{ m.}$$

Para una temperatura de líquido en el sistema de 20 a 25°C, se tiene una presión de vapor de 0,276 m.

Por lo tanto la altura neta positiva de succión disponible es:

$$NPSH = 7,6\text{m} - (0 + 0,265\text{m} + 0,249 \text{ m}) - 0,276 \text{ m}$$

$$NPSH = 7,6\text{m} - 0,265\text{m} - 0,249\text{m} - 0,276\text{m}$$

$$\mathbf{NPSH = 6,81 \text{ m}}$$

Para que una bomba funcione correctamente sin cavitación, ha de cumplirse que el NPSH DISPONIBLE en la instalación, sea igual o mayor que el NPSH REQUERIDO por la bomba.

Es decir:

NPSH disponible \geq NPSH requerido.

Como medida preventiva y de seguridad, y para cubrir condiciones transitorias, se recomienda añadir 0,5 metros al valor del NPSH requerido, quedando:

NPSH disponible \geq NPSH requerido + aproximadamente 0,5 m.

El NPSH requerido proporcionado por el fabricante es de 3 m.

Por lo tanto:

NPSH Disponible \geq NPSH requerido + 0,5 m

$$6,81 \geq (5+0,5)$$

$$6,81 \geq 5,5.$$

Esto quiere decir que la bomba debe colocarse máximo a 6,81 m por encima del nivel del agua en el tanque de suministro.

5. CURVAS CARACTERISTICAS

5.1 GENERALIDADES

Las curvas características de las bombas centrífugas permiten relacionar el gasto bombeado con presión generada, potencia absorbida, rendimiento y a veces con la altura máxima de succión.

Para una bomba centrífuga movida a una velocidad de giro constante (r.p.m), la altura (H), la potencia absorbida (Pab), y por tanto, el rendimiento (η), así como el NPSH requerido, son funciones del caudal (Q). La relación entre estos diferentes valores se representa mediante las curvas características.

En la mayoría de las curvas características se representa gráficamente la altura manométrica total (H) en metros, el rendimiento (η) en % y la potencia absorbida (Pab) en Kilovatios en las ordenadas, y el caudal (Q) en metros cúbicos hora (m^3/h) o litros por segundo (l/s) en las abscisas. La forma general de estas curvas características varía con la velocidad específica.

La curva de capacidad de carga para una velocidad constante de la bomba representa las diferentes cantidades de agua suministrada por dicha bomba al vaciar la carga. La curva de potencia muestra la cantidad de fuerza o de energía necesaria para accionar la unidad. La curva de eficiencia representa la cantidad de trabajo aprovechable de la bomba en el porcentaje aprovechable de la unidad suministrada al eje de la bomba.

Como se sabe la energía mecánica de este tipo de bombas se transfiere al fluido a través de las fuerzas centrífugas generadas en el impulsor.

En consecuencia, para la misma carcasa la intensidad de estas fuerzas varia con las dimensiones, forma y número de giros del impulsor. Así, cuando se modifica cualquiera de estos tres parámetros, se altera de modo correspondiente la curva característica de la máquina. Para determinado impulsor con forma, diámetro y rotación definidas, la curva característica de la bomba no cambia, siempre y cuando el fluido no posea una viscosidad elevada.

De lo anterior se puede decir que la curva característica representa las condiciones hidráulicas operacionales de la bomba trabajando con determinado número de revolución en la unidad de tiempo. (RPM).

5.1.1 Curva caudal – altura (Q/H). La curva conocida como H-Q muestra la relación entre la capacidad de la columna total y puede ser creciente, decreciente, con gran inclinación o casi horizontal, dependiendo del tipo de impulsor utilizado y de su diseño.

La curva de capacidad de carga para una velocidad constante de la bomba representa las diferentes cantidades de agua suministrada por dicha bomba al vaciar la carga.

Esta curva representa la relación entre la altura y caudal de una bomba centrífuga y mientras no se rebase la altura de succión admisible, la bomba trabaja sobre esta curva. Las líneas son decrecientes de izquierda a derecha.

En la curva Q/H también se refleja el rendimiento (η %) bajo la forma de una curva conoide. El rendimiento solo es válido para la bomba.

Se dice que la curva Q/H es **estable** cuando es siempre decreciente desde su punto inicial situado sobre el eje de ordenadas. En una curva Q/H estable, a cualquier valor de la altura de elevación le corresponde un valor del caudal y solo uno.

En contraste, las curvas Q/H son **inestables** si la altura de elevación aumenta primero a partir del eje de ordenadas y, tras alcanzar un máximo, vuelve a decrecer constantemente. En una curva Q/H inestable se pueden asociar dos o más valores de caudal con un único valor de altura.

5.1.2 Curva de potencia (Q/P). La curva de potencia muestra la cantidad de fuerza o energía necesaria para accionar la unidad.

Es una función de la velocidad específica y es distinta para cada forma de rodete. Las curvas indican la potencia absorbida por la bomba para los diferentes diámetros de rodete.

La potencia crece constantemente con el caudal elevado y vuelve a decrecer, por regla general, una vez rebasado el rendimiento máximo.

5.1.3 Curva de eficiencia (Q/E). La curva de eficiencia señala la cantidad de trabajo aprovechable de la bomba.

Estas curvas se clasifican de acuerdo con la forma que asumen al variar la altura manométrica con el gasto; estas pueden ser:

a) **RESING:** a medida que el gasto disminuye aumenta la altura manométrica.

b) STEEP: es una curva del mismo tipo a), y muestra gran diferencia de altura manométrica para diferentes valores del gasto.

c) FLAT: la altura manométrica varía poco con el gasto.

5.2 ECUACION DE LA BOMBA CENTRIFUGA

Las curvas por lo general se calculan en las fábricas luego de pruebas exhaustivas basándose en mediciones seguras de la capacidad del agua, presión, energía suministrada, etc. Estas curvas se utilizan para seleccionar la unidad más apropiada para la clase de parámetro que se requiera.

Es importante determinar la ecuación de la bomba centrífuga basándose en las curvas características elaboradas por el fabricante para así asegurarse de una buena selección del modelo de bomba el cual funcione con máxima eficiencia para un caudal óptimo a una altura adecuada.

Dentro de una amplia variedad de modelos de bombas ofrecidas por el fabricante, siempre hay la posibilidad de escoger una unidad que se adapte a las necesidades del interesado y lograr una eficiencia muy cercana al máximo posible.

Las bombas centrífugas no se pueden especificar únicamente por los diámetros de succión y descarga, puesto que ellas no dan la información necesaria para su utilización en un trabajo determinado. Es por ello que se requiere especificar la altura de bombeo y la cantidad de líquido que se puede movilizar hasta esa altura.

- **Determinación de la curva de una bomba:**

A continuación se va a describir la manera de determinar la ecuación de la bomba centrífuga basándose en las curvas características proporcionada por el fabricante. Para nuestro caso la bomba es de 1hp, motor WEG marca IHM de 3645 rpm. Esta curva es de gran utilidad para tener una idea clara de la altura real que alcanza a desarrollar la bomba y su caudal óptimo sin tener en cuenta todavía las pérdidas por fricción y accesorios.

De las curvas proporcionadas por el fabricante para las especificaciones de la bomba, se toman ciertos valores de caudal y se encuentran para cada valor su cabeza o altura.

Cuadro 7. Valores de caudal y altura de las curvas del fabricante de la bomba.

CAUDAL (GPM)	CAUDAL (LPS)	CABEZA (M)
20	1,26	27,45
40	2,52	20
54,17	3,42	8,16

Con los anteriores datos determinamos las variables correspondientes para determinar la ecuación de la bomba.

$$H_m = A Q^2 + B Q + C \quad (\text{EC. 26})$$

Resolviendo el anterior sistema de ecuaciones y teniendo en cuenta los valores de caudal en m³/seg, nos da como resultado lo siguiente:

$$A = - 3342857,14$$

$$B = 6717,46$$

$$C = 24,31.$$

Remplazando los anteriores valores en (Ec. 26) se obtiene la ecuación de la bomba para obtener la altura real desarrollada por la bomba.

Esta ecuación será necesaria para la determinación de la curva eficiencia caudal y potencia caudal ya que se necesita conocer valores de alturas para distintos caudales.

$$H_m = - 3342857,14Q^2 + 6717,46 Q + 24,31$$

5.3 OBTENCION CURVAS CARACTERISTICAS

Debido a que el fabricante no nos proporcionó el catálogo de la bomba, mediante ensayos de laboratorio se obtuvieron algunas de las características de la bomba. El proceso para su obtención es el siguiente:

5.3.1 Curva caudal - altura. La curva se realiza para 3645 y 3585 rpm, la cual se controla por medio de un sistema digital conectado a la bomba. Para variar el caudal se utiliza una válvula de compuerta abierta la cual está instalada en la tubería de impulsión. La medición del caudal se hizo por medio de aforo volumétrico y la lectura de presión de agua se hizo en dos manómetros ubicados en la succión y descarga. Tomamos 5 mediciones para cada punto y mediante un programa de computación se logró ajustar los puntos a la ecuación de la curva más indicada.

Para obtener la curva caudal – altura se realiza varios aforos de caudal de donde se obtiene distintas alturas que se leen en la escala del vertedero para con estas calcular los respectivos caudales.

Las presiones se leen en los manómetros instalados tanto en la succión como en la descarga. En la succión se tiene un manómetro en U de mercurio y en la descarga un manómetro tipo Bourdon.

- P_s = Presión en la succión. La lectura se da en cm de columna de mercurio. Para el cálculo de esta presión se saca la diferencia de las lecturas de la parte izquierda del manómetro menos la lectura en la parte derecha. Luego este valor se convierte a metros de columna de agua.
- P_d = Presión en la impulsión. La lectura se da en psi. Este valor se lo transforma a metros de columna de agua. Esta presión se obtiene a medida que se va cerrando la válvula de compuerta instalada en la descarga.
- P_t = Presión total. Que es la diferencia de $P_d - P_s$.

Por ejemplo. Para una presión en la impulsión de 5 psi se tiene una altura en el vertedero de 8,6 cm y con esta un caudal de 2,93 lps o 46,4 gpm.

$$P_s = (P_{der} - P_{iz}) * \gamma_{Hg}$$

P_{iz} = Lectura en el lado izquierdo = 10,2 cm Hg.

P_{der} = Lectura en el lado derecho = 5,2 cm Hg.

γ_{Hg} = Peso específico de mercurio = $13,54 \text{ gr/cm}^3 = 0,01354 \text{ Kg/cm}^3$.

$$P_s = (5,2 - 10,2)\text{cm} * 0,01354 \text{ Kg/cm}^3.$$

$$P_s = - 0,0677 \text{ Kg/cm}^2$$

Como 1 Kg/cm^2 es igual a 10 metros de columna de agua se tiene:

$$P_s = (-0,77 \text{ Kg/cm}^2 * 10 \text{ mca}) / 1 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\mathbf{P_s = -0,677 \text{ m.}}$$

$P_d = 5 \text{ psi}$. Como 1 PSI es igual a 0,7 metros de columna de agua tenemos:

$$P_d = (5 \text{ psi} * 0,7 \text{ mca}) / 1 \text{ psi.}$$

$$\mathbf{P_d = 3,5 \text{ m.}}$$

$$\text{PRESION} = P_d - P_s$$

$$P = 3,5\text{m} - (-0,677\text{m})$$

$$\mathbf{P = 4,18 \text{ m}}$$

El anterior procedimiento es igual para los demás datos del ensayo.

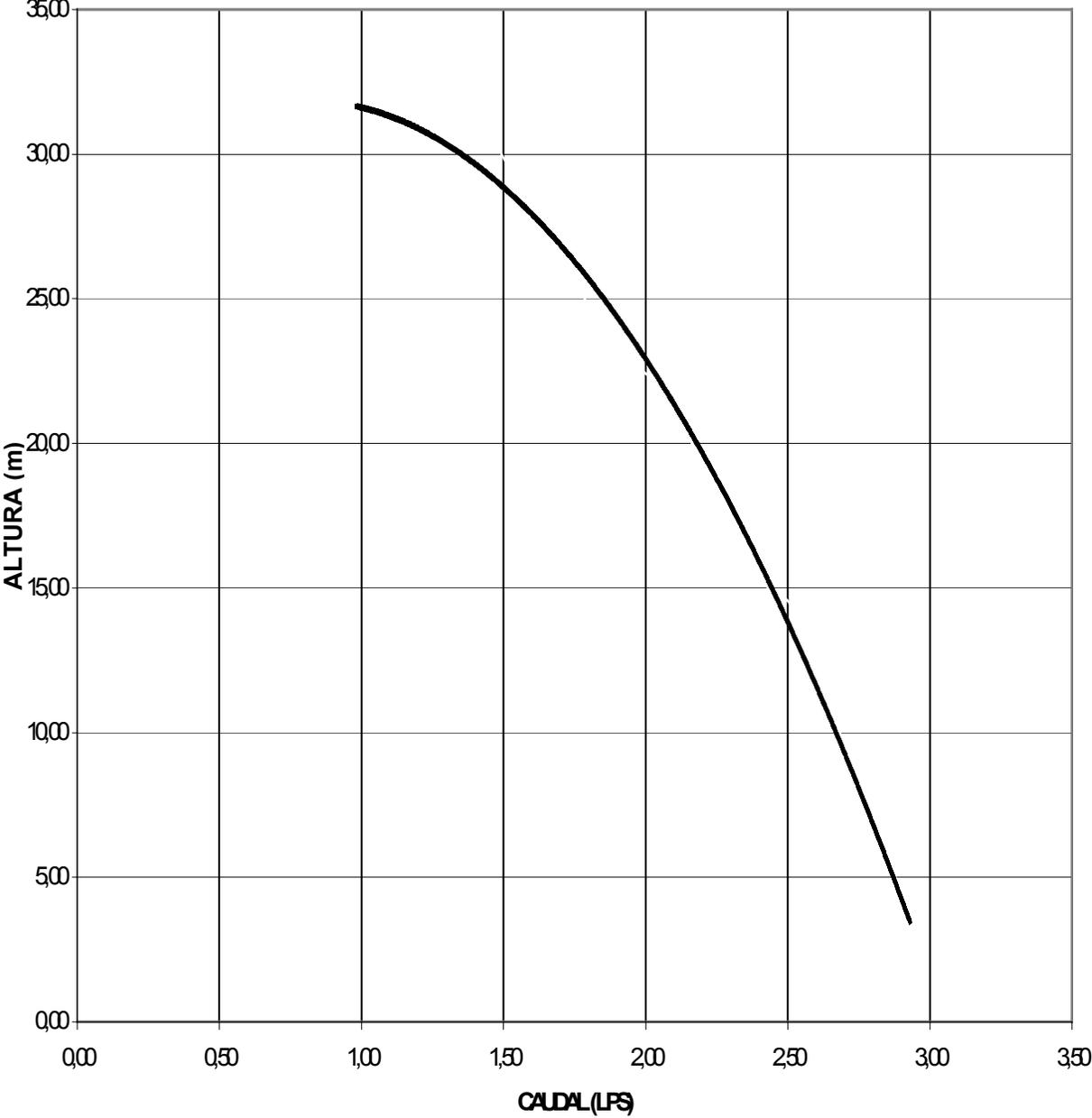
Se realizan para dos variaciones en las revoluciones de la bomba.

Los datos obtenidos se presentan en los cuadros 8 y 9 y las gráficas en las figuras 24 y 25.

Cuadro 8. Relación caudal – altura para 3645 RPM.

AFORO No	H. Vert. (cm)	H. Vert. (m)	CAUDAL (LPS)	Pd (m)	Ps (m)	PRESIÓN (m)
1	8,60	0,086	2,93	0,00	-0,704	0,70
	8,60	0,086	2,93	1,40	-0,704	2,10
	8,60	0,086	2,93	2,10	-0,704	2,80
	8,60	0,086	2,93	3,50	-0,677	4,18
2	8,50	0,085	2,88	4,20	-0,663	4,86
	8,50	0,085	2,88	4,90	-0,663	5,56
3	8,40	0,084	2,83	6,30	-0,623	6,92
	8,40	0,084	2,83	7,00	-0,609	7,61
4	8,20	0,082	2,74	7,70	-0,596	8,30
5	8,10	0,081	2,69	8,40	-0,582	8,98
	8,10	0,081	2,69	9,10	-0,569	9,67
6	8,00	0,080	2,65	10,50	-0,542	11,04
7	7,90	0,079	2,60	11,20	-0,542	11,74
	7,90	0,079	2,60	11,90	-0,515	12,41
8	7,80	0,078	2,55	12,60	-0,501	13,10
9	7,70	0,077	2,51	14,00	-0,460	14,46
10	7,50	0,075	2,42	14,70	-0,460	15,16
	7,50	0,075	2,42	15,40	-0,433	15,83
11	7,40	0,074	2,37	16,10	-0,406	16,51
12	7,20	0,072	2,28	17,50	-0,393	17,89
13	7,10	0,071	2,24	18,20	-0,379	18,58
	7,10	0,071	2,24	18,90	-0,352	19,25
14	6,80	0,068	2,11	20,30	-0,325	20,62
	6,80	0,068	2,11	21,00	-0,311	21,31
15	6,70	0,067	2,06	21,70	-0,284	21,98
16	6,50	0,065	1,98	22,40	-0,244	22,64
17	6,10	0,061	1,81	24,50	-0,190	24,69
18	5,90	0,059	1,72	25,90	-0,149	26,05
19	5,6	0,056	1,60	28,00	-0,095	28,09
20	5,3	0,053	1,48	30,10	-0,068	30,17

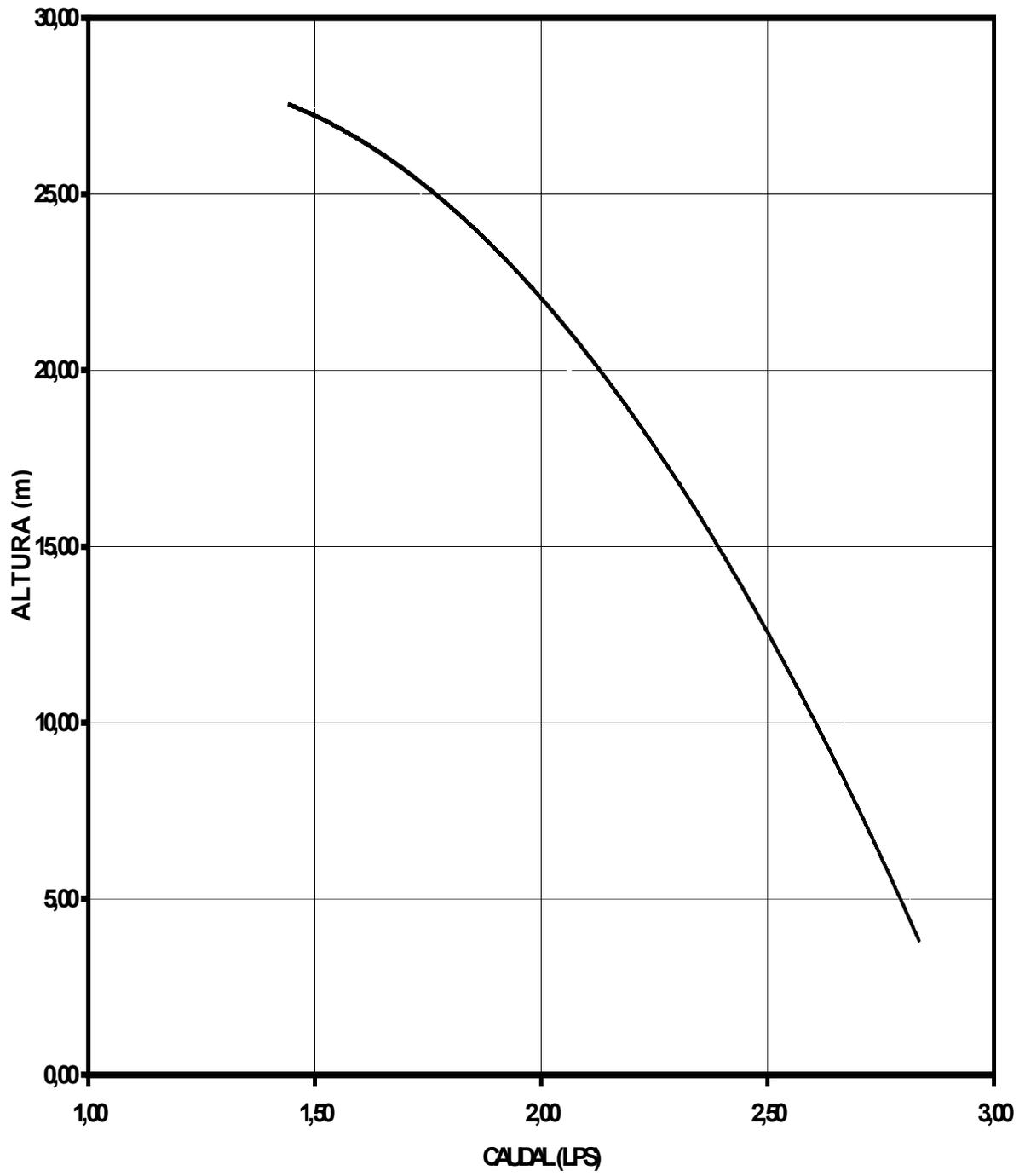
Figura 24. Curva caudal – altura para 3685 RPM



Cuadro 9. Relación caudal – altura para 3585 RPM

AFORO No	H. Vert. (cm)	H. Vert. (m)	CAUDAL (LPS)	Pd (m)	Ps (m)	PRESIÓN (m)
1	8,40	0,084	2,83	0,00	-0,650	0,65
	8,40	0,084	2,83	1,40	-0,731	2,13
	8,40	0,084	2,83	2,10	-0,691	2,79
	8,40	0,084	2,83	3,50	-0,636	4,14
2	8,30	0,083	2,79	5,60	-0,636	6,24
	8,30	0,083	2,79	7,00	-0,596	7,60
3	8,20	0,082	2,74	8,40	-0,569	8,97
4	7,90	0,079	2,60	10,50	-0,528	11,03
5	7,60	0,076	2,46	12,60	-0,487	13,09
6	7,50	0,075	2,42	14,00	-0,460	14,46
7	7,20	0,072	2,28	16,10	-0,420	16,52
6	7,20	0,072	2,28	17,50	-0,379	17,88
8	6,70	0,067	2,06	19,60	-0,311	19,91
	6,70	0,067	2,06	21,00	-0,298	21,30
9	6,00	0,060	1,77	24,50	-0,176	24,68
10	5,20	0,052	1,44	28,00	-0,054	28,05

Figura 25. Curva caudal – altura para 3585 RPM



5.4 CURVAS CARACTERISTICAS DEL BANCO DE PRUEBAS

5.4.1 Curva caudal – altura:

Para obtener esta curva se plantea el teorema de Bernoulli entre los puntos de la tubería de succión y la tubería de descarga.

$$\begin{aligned} P_s / \gamma + V_s^2 / 2g + Z_s &= P_d / \gamma + V_d^2 / 2g + Z_d - H_b + H_f. \\ H_b &= (P_i - P_s) / \gamma + (V_i^2 - V_s^2) / 2g + (Z_i - Z_a) + H_f \quad (\text{Ec. 27}) \end{aligned}$$

Donde:

H_b = altura de elevación de la bomba.

P / γ = diferencia de presión entre los puntos de succión e impulsión.

$(V_i^2 - V_s^2) / 2g$ = diferencia de velocidad entre la succión e impulsión.

$(Z_i - Z_s)$ = diferencia de altura entre los puntos de succión e impulsión.

H_f = pérdida de presión por fricción y accesorios entre succión e impulsión.

Las curvas características se hicieron para unas velocidades de 3645 y 3585 RPM, las cuales se controlaron por medio de un sistema digital conectado a la bomba, la variación del caudal se realizó con una válvula de compuerta.

- Método para construir la curva:
 - Se hace funcionar la bomba hasta que se estabilice.
 - Con el sistema digital se fija el voltaje para mantener las revoluciones por minuto constantes para cada ensayo.

- El caudal se lo mide por medio de las lecturas en la escala del vertedero.
- Para hallar la diferencia de presión entre los puntos de la tubería de succión y de impulsión, se realiza mediante la lectura en los manómetros. De acuerdo a los anteriores parámetros se tienen los resultados descritos en el cuadro 10.

Cuadro 10. Relación caudal - altura del modelo para 3645 RPM

PRESION			CAUDAL		
P succión	P impulsión	P impulsión	H. Vert.	CAUDAL	CAUDAL
(m)	(PSI)	(m)	(cm)	(LPS)	(GPM)
-0,70	0,00	0,00	8,60	2,93	46,44
-0,70	2,00	1,40	8,60	2,93	46,44
-0,70	3,00	2,10	8,60	2,93	46,44
-0,68	5,00	3,50	8,60	2,93	46,44
-0,66	6,00	4,20	8,50	2,88	45,68
-0,66	7,00	4,90	8,50	2,88	45,68
-0,62	9,00	6,30	8,40	2,83	44,92
-0,61	10,00	7,00	8,40	2,83	44,92
-0,60	11,00	7,70	8,20	2,74	43,43
-0,58	12,00	8,40	8,10	2,69	42,68
-0,57	13,00	9,10	8,10	2,69	42,68
-0,54	15,00	10,50	8,00	2,65	41,94
-0,54	16,00	11,20	7,90	2,60	41,21
-0,51	17,00	11,90	7,90	2,60	41,21
-0,50	18,00	12,60	7,80	2,55	40,48
-0,46	20,00	14,00	7,70	2,51	39,75
-0,46	21,00	14,70	7,50	2,42	38,30
-0,43	22,00	15,40	7,50	2,42	38,30
-0,41	23,00	16,10	7,40	2,37	37,59
-0,39	25,00	17,50	7,20	2,28	36,16
-0,38	26,00	18,20	7,10	2,24	35,46
-0,35	27,00	18,90	7,10	2,24	35,46
-0,32	29,00	20,30	6,80	2,11	33,37
-0,31	30,00	21,00	6,80	2,11	33,37
-0,28	31,00	21,70	6,70	2,06	32,68
-0,24	32,00	22,40	6,50	1,98	31,32
-0,19	35,00	24,50	6,10	1,81	28,64

P succión	P impulsión	P impulsión	H. Vert.	CAUDAL	CAUDAL
(m)	(PSI)	(m)	(cm)	(LPS)	(GPM)
-0,09	40	28,00	5,6	1,60	25,39
-0,07	43	30,10	5,3	1,48	23,50

El proceso para el cálculo de la altura de elevación de la bomba es el siguiente:

Al hacer los respectivos ensayos de aforo de caudal y obteniendo en la escala del vertedero la lectura de varias alturas se calculan los respectivos caudales.

Para cada caudal se calculan las pérdidas por fricción y accesorios tanto en la succión como en la impulsión para obtener las pérdidas totales del sistema. Así:

Realizamos el procedimiento para un caudal de 2,93 lps o 46,44 gpm.

- **Pérdidas por fricción en la tubería de succión.**

Según Hazen Williams

$$h_f = (0,2083 * (100/150)^{1,85}) * (46,44^{1,85}) / (1,688^{4,866})$$

$$h_f = (0,0985 * (46,44^{1,85}) / (1,688^{4,866})) * L$$

$$h_f = (9,348 \text{ m} / 100 \text{ m}) * 0,22 \text{ m}$$

$$h_f = \mathbf{0,0206 \text{ m.}}$$

- **Pérdidas por fricción en la tubería de impulsión.**

$$h_f = (0,2083 * (100/150)^{1,85}) * (46,44^{1,85}) / (2,109^{4,866})$$

$$h_f = (0,0985 * (46,44^{1,85}) / (2,109^{4,866})) * L$$

$$h_f = (3,163 \text{ m} / 100 \text{ m}) * 5,014 \text{ m}$$

$$h_f = \mathbf{0,159 \text{ m.}}$$

Por lo tanto las pérdidas totales por fricción para un caudal de 2,93 lps son:

$$h_f = 0,0206 \text{ m} + 0,159 \text{ m}$$

$$h_f = \mathbf{0,179 \text{ m.}}$$

- **Pérdidas menores en la succión.**

En la succión se presenta una pérdida menor por entrada del tanque a la tubería, la cual es una pérdida por conducto de proyección hacia adentro o de tipo borda, cuyo valor del coeficiente de resistencia $K = 1,0$ (ver cuadro 2).

Para un caudal de 2,93 LPS o 46,44GPM.

$$V = Q/A$$

$$V = (0,00293 \text{ m}^3/\text{s}) / ((\pi / 4) * (0,0381^2))$$

$$V = \mathbf{2,570 \text{ m/s.}}$$

$$h_L = K * (v^2/2g)$$

$$h_L = 1,0 * ((2,570\text{m/s})^2/(2*9,81\text{m/s}^2))$$

$$h_L = \mathbf{0,337 \text{ m.}}$$

- **Pérdidas menores en la impulsión.**

Para un caudal de 2,93 LPS y una velocidad de 2,570 m/s La pérdida es:

- Ampliación brusca de 1 1/2 a 2 pulgadas, para cada caudal obtenemos un valor de velocidad y para este valor un coeficiente de resistencia $K=0,24$ (Ver cuadro 3).

$$h_L = K * (v^2/2g)$$

$$h_L = 0,24 * ((2,570\text{m/s})^2/(2*9,81\text{m/s}^2))$$

$$h_L = \mathbf{0,081 \text{ m.}}$$

- 4 codos de 90° de diámetro 2 pulgadas en PVC.

$$h_L = (0,0985 * (46,44^{1,85}) / (2,109^{4,866})) * K$$

$$h_L = (3,163 \text{ m} / 100\text{m}) * (1,7^4) \text{ m}$$

$$h_L = \mathbf{0,215 \text{ m.}}$$

- Válvula de compuerta abierta diámetro 2 pulgadas

$$h_L = (0,0985 * (46,44^{1,85}) / (2,109^{4,866})) * K$$

$$h_L = (3,163 \text{ m} / 100\text{m}) * (0,4) \text{ m}$$

$$h_L = \mathbf{0,0127\text{m.}}$$

Por lo tanto la pérdida total por accesorios es:

$$h_L = 0,337 \text{ m} + 0,081 \text{ m} + 0,215 \text{ m} + 0,0127 \text{ m}$$

$$h_L = \mathbf{0,645 \text{ m.}}$$

- **Pérdidas totales.**

La pérdida total por fricción y accesorios es:

$$h_t = h_f + h_L$$

$$h_t = 0,179 \text{ m} + 0,645 \text{ m}$$

$$h_t = \mathbf{0,82 \text{ m.}}$$

Para los demás valores de caudal se realiza el procedimiento anterior. Se hace el ensayo para dos variaciones de revoluciones en la bomba.

Los resultados para 3645 rpm se encuentran en el cuadro 11 y la gráfica en la figura 26. Los resultados para 3585 RPM se encuentran en los cuadros 12 y 13 y la gráfica en la figura 27.

5.4.2 Punto de operación

Una vez construidas las curvas de la bomba y la del sistema es fácil encontrar el punto de operación de esta, es decir, el caudal que esta siendo enviado y la cabeza suministrada por la bomba. Dicho punto de operación es el corte de las dos curvas anteriores

- **Curva característica de la tubería**

Para encontrar el punto de operación de la bomba se construye la curva característica de la tubería que es la relación entre la altura estática + pérdidas totales vs caudal.

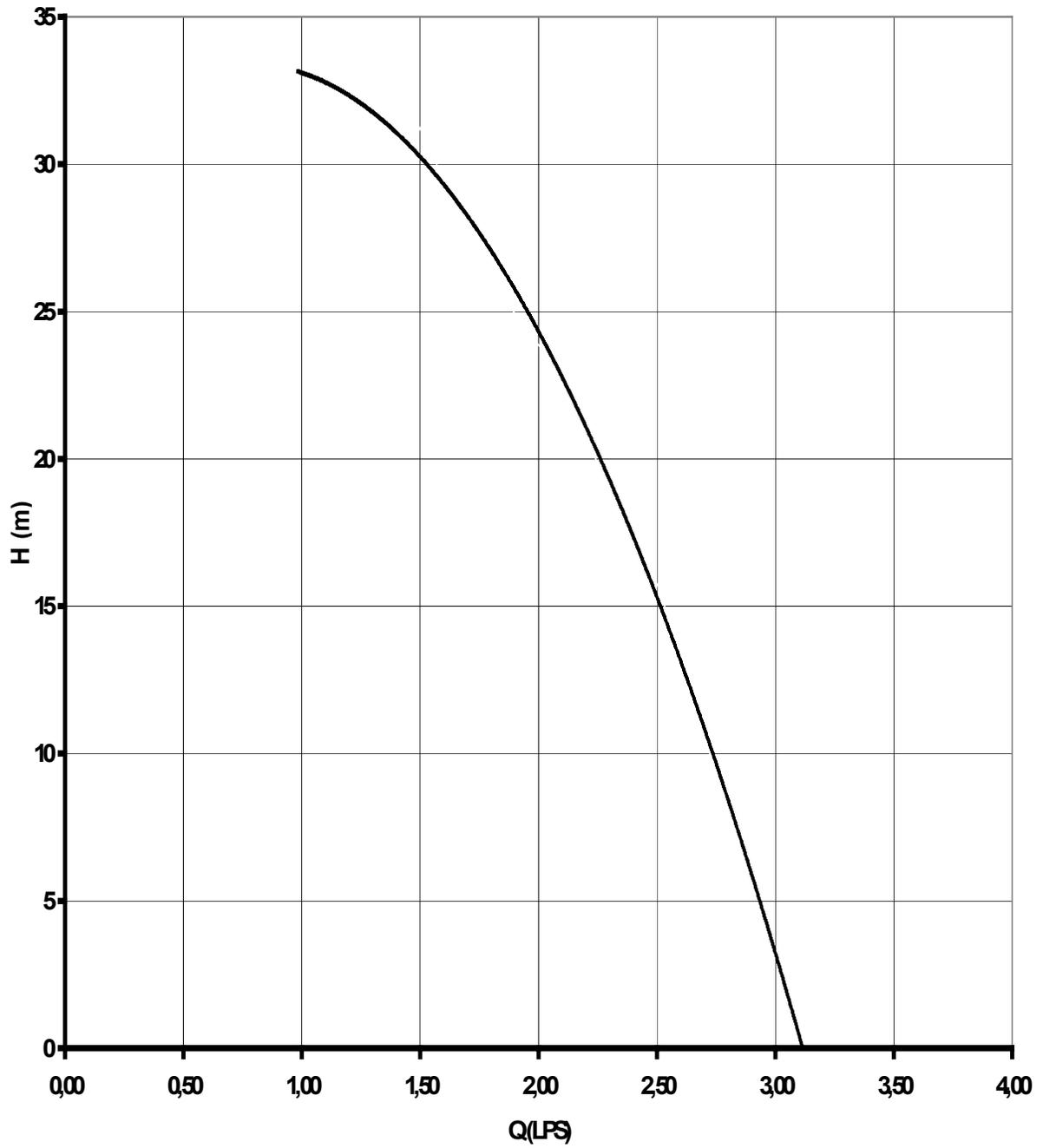
Los resultados para obtener la curva característica de la tubería a 3645 rpm se presentan en el cuadro 14 y la gráfica en la figura 28.

Los resultados para obtener la curva característica de la tubería a 3585 rpm se presentan en el cuadro 15 y la gráfica en la figura 29.

Cuadro 11. Altura de elevación de la bomba para 3645rpm

H. Vert. (cm)	CAUDAL		PERDIDAS TOTALES						
	CAUDAL (lps)	CAUDAL (gpm)	FRICCION (m)	MENORES (m)	PER.TOTAL (m)	P/T (m)	Z (m)	$(Vf^2 - Vs^2)/2g$ (m)	HB (m)
8,60	2,93	46,44	0,179	0,645	0,82	0,65	1,16	-0,250	2,38
8,60	2,93	46,44	0,179	0,645	0,82	2,13	1,16	-0,25	3,86
8,60	2,93	46,44	0,179	0,645	0,82	2,79	1,16	-0,25	4,52
8,60	2,93	46,44	0,179	0,645	0,82	4,12	1,16	-0,25	5,86
8,50	2,88	45,68	0,174	0,625	0,80	4,84	1,16	-0,24	6,55
8,50	2,88	45,68	0,174	0,625	0,80	5,50	1,16	-0,24	7,21
8,40	2,83	44,92	0,169	0,605	0,77	6,87	1,16	-0,23	8,57
8,40	2,83	44,92	0,169	0,605	0,77	7,53	1,16	-0,23	9,23
8,20	2,74	43,43	0,158	0,566	0,72	8,19	1,16	-0,22	9,85
8,10	2,69	42,68	0,153	0,547	0,70	8,86	1,16	-0,21	10,51
8,10	2,69	42,68	0,153	0,547	0,70	9,52	1,16	-0,21	11,17
8,00	2,65	41,94	0,148	0,529	0,68	10,88	1,16	-0,20	12,51
7,90	2,60	41,21	0,144	0,511	0,65	11,51	1,16	-0,20	13,13
7,90	2,60	41,21	0,144	0,511	0,65	12,20	1,16	-0,20	13,82
7,80	2,55	40,48	0,139	0,494	0,63	12,78	1,16	-0,19	14,38
7,70	2,51	39,75	0,134	0,477	0,61	14,05	1,16	-0,18	15,64
7,50	2,42	38,30	0,125	0,443	0,57	15,16	1,16	-0,17	16,72
7,50	2,42	38,30	0,125	0,443	0,57	15,83	1,16	-0,17	17,39
7,40	2,37	37,59	0,121	0,427	0,55	16,51	1,16	-0,16	18,05
7,20	2,28	36,16	0,113	0,397	0,51	17,89	1,16	-0,15	19,41
7,10	2,24	35,46	0,109	0,382	0,49	18,58	1,16	-0,15	20,08
7,10	2,24	35,46	0,109	0,382	0,49	19,25	1,16	-0,15	20,76
6,80	2,11	33,37	0,097	0,339	0,44	20,62	1,16	-0,13	22,09
6,80	2,11	33,37	0,097	0,339	0,44	21,31	1,16	-0,13	22,78
6,70	2,06	32,68	0,094	0,326	0,42	21,98	1,16	-0,12	23,44
6,50	1,98	31,32	0,086	0,300	0,39	22,64	1,16	-0,11	24,08
6,10	1,81	28,64	0,073	0,252	0,33	24,69	1,16	-0,10	26,08
5,90	1,72	27,33	0,067	0,231	0,30	26,05	1,16	-0,09	27,42
5,6	1,60	25,39	0,059	0,200	0,26	28,09	1,16	-0,08	29,44
5,3	1,48	23,50	0,051	0,172	0,22	30,17	1,16	-0,06	31,49

Figura 26. Curva caudal altura del modelo para 3645 RPM



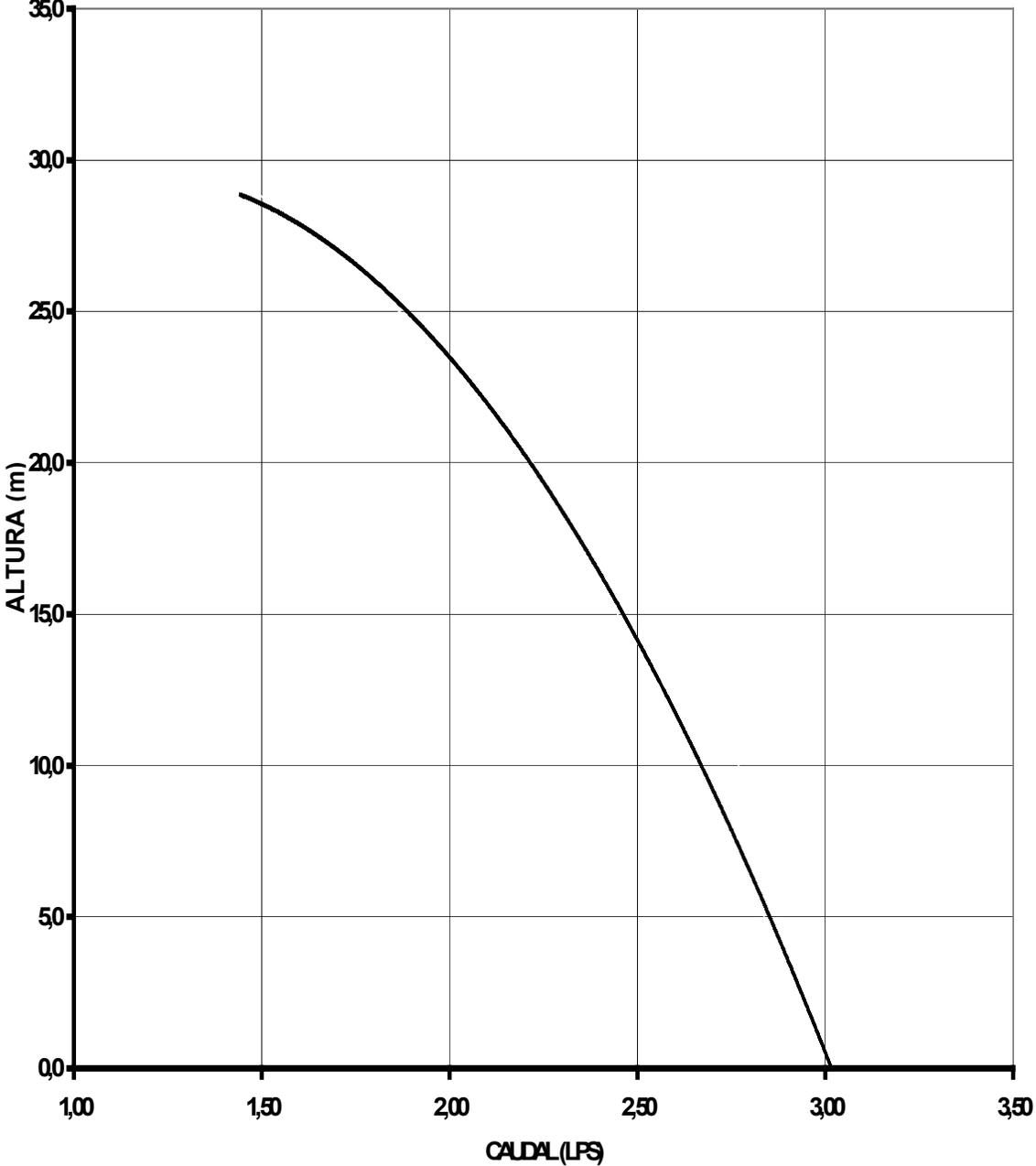
Cuadro 12. Altura de elevación de la bomba para 3585 RPM

PRESION			CAUDAL		
P succión	P impulsión	P impulsión	H. Vert.	CAUDAL	CAUDAL
(m)	(PSI)	(m)	(cm)	(LPS)	(GPM)
-0,65	0,00	0,00	8,40	2,83	44,92
-0,73	2,00	1,40	8,40	2,83	44,92
-0,69	3,00	2,10	8,40	2,83	44,92
-0,62	5,00	3,50	8,40	2,83	44,92
-0,64	8,00	5,60	8,30	2,79	44,17
-0,60	10,00	7,00	8,30	2,79	44,17
-0,57	12,00	8,40	8,20	2,74	43,43
-0,53	15,00	10,50	7,90	2,60	41,21
-0,49	18,00	12,60	7,60	2,46	39,02
-0,46	20,00	14,00	7,50	2,42	38,30
-0,42	23,00	16,10	7,20	2,28	36,16
-0,38	25,00	17,50	7,20	2,28	36,16
-0,31	28,00	19,60	6,70	2,06	32,68
-0,30	30,00	21,00	6,70	2,06	32,68
-0,18	35,00	24,50	6,00	1,77	27,98
-0,05	40,00	28,00	5,20	1,44	22,88

Cuadro 13. Altura de elevación de la bomba para 3585 rpm

H. Vert.	CAUDAL		PERDIDAS TOTALES			P/T	Z	$(Vf^2 - Vs^2)/2g$	HB
	CAUDAL	CAUDAL	FRICCION	MENORES	PER.TOTAL				
(cm)	(lps)	(gpm)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
8,40	2,834	44,924	0,1685	0,6048	0,773	0,65	1,16	-0,234	2,35
8,40	2,83	44,92	0,169	0,605	0,77	2,13	1,16	-0,23	3,83
8,40	2,83	44,92	0,169	0,605	0,77	2,79	1,16	-0,23	4,49
8,40	2,83	44,92	0,169	0,605	0,77	4,12	1,16	-0,23	5,82
8,30	2,79	44,17	0,163	0,585	0,75	6,24	1,16	-0,23	7,92
8,30	2,79	44,17	0,163	0,585	0,75	7,60	1,16	-0,23	9,28
8,20	2,74	43,43	0,158	0,566	0,72	8,97	1,16	-0,22	10,63
7,90	2,60	41,21	0,144	0,511	0,65	11,03	1,16	-0,20	12,65
7,60	2,46	39,02	0,130	0,460	0,59	13,09	1,16	-0,18	14,66
7,50	2,42	38,30	0,125	0,443	0,57	14,46	1,16	-0,17	16,02
7,20	2,28	36,16	0,113	0,397	0,51	16,52	1,16	-0,15	18,04
7,20	2,28	36,16	0,113	0,397	0,51	17,88	1,16	-0,15	19,40
6,70	2,06	32,68	0,094	0,326	0,42	19,91	1,16	-0,12	21,37
6,70	2,06	32,68	0,094	0,326	0,42	21,30	1,16	-0,12	22,75
6,00	1,77	27,98	0,070	0,241	0,31	24,68	1,16	-0,09	26,06
5,20	1,44	22,88	0,048	0,163	0,21	28,05	1,16	-0,06	29,36

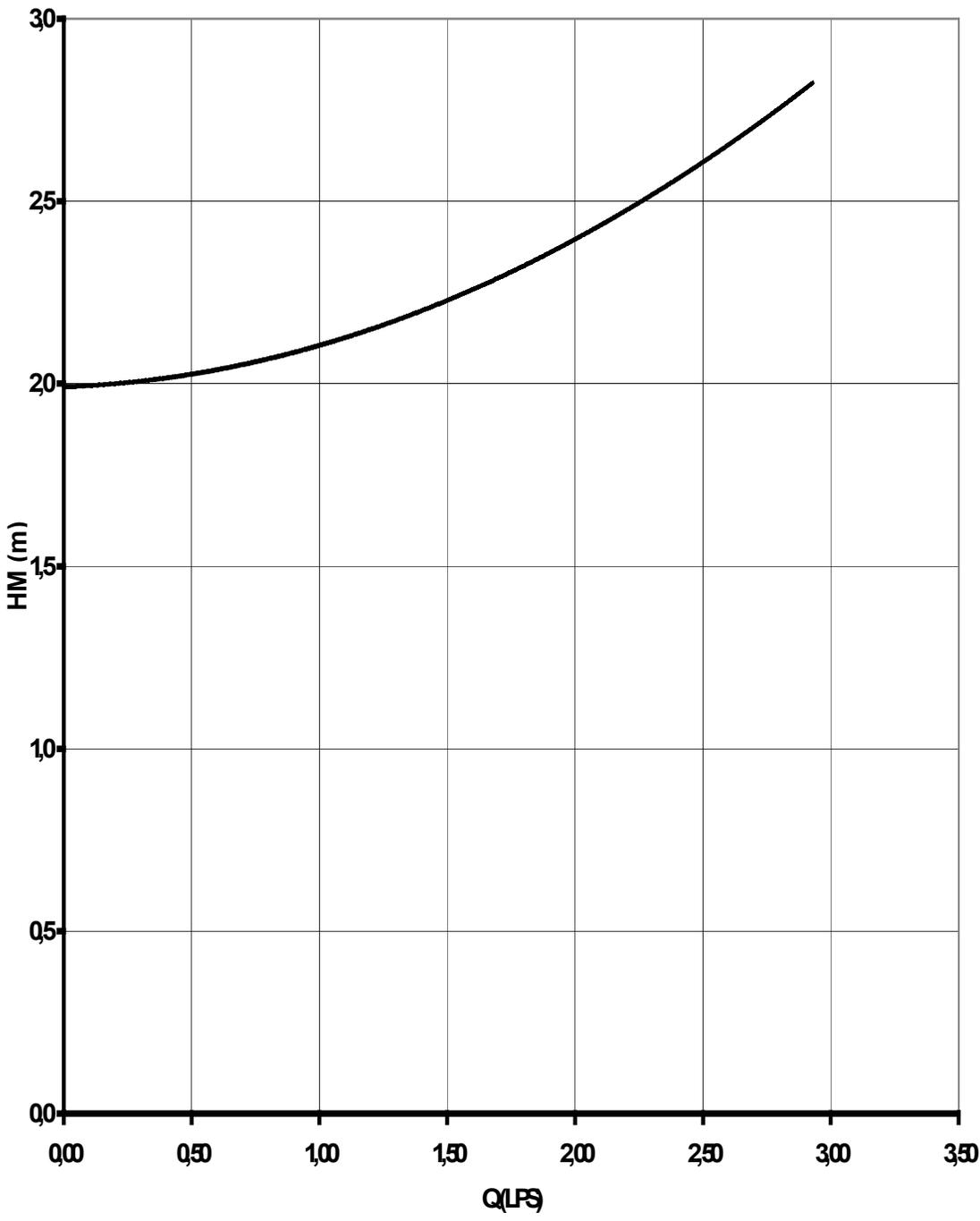
Figura 27. Curva caudal - altura del modelo para 3585 RPM



Cuadro 14. Relación altura caudal de la tubería para 3645 RPM

CAUDAL (LPS)	PER.TOTA L (m)	Hestática (m)	H (m)
2,930	0,824	2,0	2,824
2,93	0,82		2,824
2,93	0,82		2,824
2,93	0,82		2,824
2,88	0,80		2,799
2,88	0,80		2,799
2,83	0,77		2,773
2,83	0,77		2,773
2,74	0,72		2,724
2,69	0,70		2,701
2,69	0,70		2,701
2,65	0,68		2,678
2,60	0,65		2,655
2,60	0,65		2,655
2,55	0,63		2,633
2,51	0,61		2,611
2,42	0,57		2,569
2,42	0,57		2,569
2,37	0,55		2,549
2,28	0,51		2,509
2,24	0,49		2,490
2,24	0,49		2,490
2,11	0,44		2,436
2,11	0,44		2,436
2,06	0,42		2,419
1,98	0,39		2,386
1,81	0,33		2,325
1,72	0,30		2,298
1,60	0,26	2,259	
1,48	0,22	2,223	

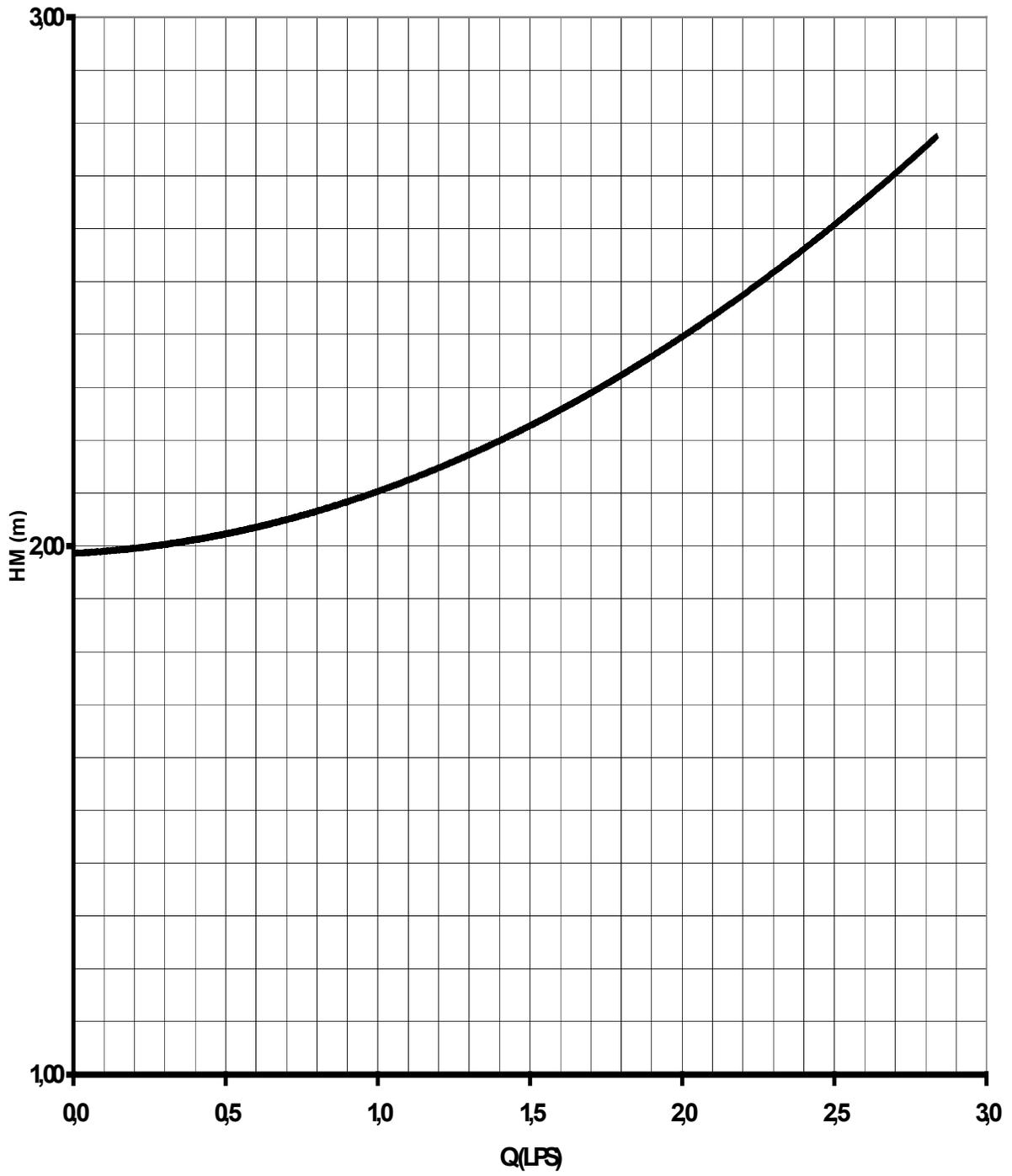
Figura 28. Curva característica de la tubería caudal – altura para 3645 RPM



Cuadro 15. Relación caudal – altura de la tubería para 3585 RPM

CAUDAL (LPS)	PER.TOTAL (m)	Hest (m)	H (m)
2,834	0,773	2	2,773
2,83	0,77		2,773
2,83	0,77		2,773
2,83	0,77		2,773
2,79	0,75		2,749
2,79	0,75		2,749
2,74	0,72		2,724
2,60	0,65		2,655
2,46	0,59		2,590
2,42	0,57		2,569
2,28	0,51		2,509
2,28	0,51		2,509
2,06	0,42		2,419
2,06	0,42		2,419
1,77	0,31		2,311
1,44	0,21		2,211

Figura 29. Curva característica de la tubería para 3585 RPM



El punto de operación a 3645 rpm es:

H = 2,97 m.

Q = 3 LPS.

El punto de operación a 3585 rpm es:

H = 2,27 m.

Q = 2,94 lps.

5.4.3 Curva de potencia – caudal, eficiencia – caudal.

Es importante tener nuevamente presentes los conceptos de potencia útil, potencia absorbida y rendimiento.

- **Potencia Util:**

La potencia útil de una bomba centrífuga, es el producto de la altura real desarrollada por la bomba (altura manométrica) por el peso específico del líquido y por el caudal que bombea. Lo anterior se lo multiplica por 9,81 para obtener la potencia en wattios.

$$\mathbf{Pu = \gamma * Q * H * 9,81} \qquad \mathbf{(Ec. 28)}$$

Representando:

Q = Caudal, en m³/seg.

H = Altura, en metros.

Pu = Potencia útil, en wattios.

γ = Peso específico, en Kg/m³.

- **Potencia absorbida:**

La potencia absorbida es la potencia entregada por el motor. Se expresa como:

$$P_{ab} = V * I * \cos \theta. \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde:

V = voltaje en voltios.

I = corriente en amperios.

Cos θ = factor de potencia.

El factor de potencia viene dado en las especificaciones de la bomba y es igual para todos los cambios de revolución que se le puede hacer a través del sistema digital a la bomba para realizar los diferentes ensayos.

El factor de potencia es igual a:

$$\text{Cos } \theta = 0,72.$$

- **Rendimiento de la bomba:**

En las bombas centrífugas, el rendimiento varía con el caudal y la altura de elevación. Un valor medio para cálculos aproximados sería el de 0,7 (70%).

El rendimiento η o eficiencia, establece la relación entre la potencia útil suministrada por la bomba y la potencia absorbida en el eje.

$$\eta (\%) = \text{Potencia útil} / \text{Potencia absorbida} \quad (\text{Ec. 30})$$

Para la construcción de la curva potencia – caudal se utilizó el sistema digital para medir el voltaje y amperaje consumidos por el motor. Con éste mismo sistema digital se mantuvo constantes las revoluciones y se las modifíco para la realización de otros ensayos.

En el cuadro 16 y en la figura 30 Y 31 se presentan los datos de la relación entre potencia, eficiencia y caudal para 3645 rpm.

En el cuadro 17 y en la figura 32 Y 33 se presentan los datos de la relación entre potencia, eficiencia y caudal para 3585 rpm.

Cuadro 16. Relación Potencia, eficiencia - caudal para 3645 RPM

H. Vert.	CAUDA L	H	I	V	FACTOR	Putil	Pabsorbida	POTENCIA	Rendimiento
(cm)	(LPS)	(m)	(amp)	(voltios)	POTENCIA	(wattios)	(wattios)	(HP)	(%)
8,60	2,93	15,30	15,36	117,00	0,72	439,70	1294,05	1,74	33,98
8,60	2,93	15,30	15,34	116,50	0,72	439,70	1286,72	1,73	34,17
8,60	2,93	15,30	14,89	115,50	0,72	439,70	1238,39	1,66	35,51
8,60	2,93	15,30	15,39	117,50	0,72	439,70	1301,82	1,75	33,78
8,50	2,88	15,91	14,81	114,00	0,72	449,70	1215,44	1,63	37,00
8,50	2,88	15,91	15,41	117,50	0,72	449,70	1303,93	1,75	34,49
8,40	2,83	16,50	14,73	114,00	0,72	458,67	1209,31	1,62	37,93
8,40	2,83	16,50	15,31	117,50	0,72	458,67	1295,51	1,74	35,40
8,20	2,74	17,62	14,77	114,00	0,72	473,63	1211,99	1,63	39,08
8,10	2,69	18,16	15,16	116,50	0,72	479,70	1271,98	1,71	37,71
8,10	2,69	18,16	14,69	114,00	0,72	479,70	1206,08	1,62	39,77
8,00	2,65	18,68	15,07	116,00	0,72	484,87	1258,51	1,69	38,53
7,90	2,60	19,18	14,70	114,00	0,72	489,17	1206,17	1,62	40,56
7,90	2,60	19,18	15,11	116,00	0,72	489,17	1262,35	1,69	38,75
7,80	2,55	19,67	14,71	114,00	0,72	492,64	1207,53	1,62	40,80
7,70	2,51	20,13	14,99	115,00	0,72	495,30	1241,45	1,66	39,90
7,50	2,42	21,02	14,64	113,00	0,72	498,35	1191,11	1,60	41,84
7,50	2,42	21,02	14,88	115,50	0,72	498,35	1237,28	1,66	40,28
7,40	2,37	21,44	14,54	113,00	0,72	498,79	1182,81	1,59	42,17
7,20	2,28	22,24	14,76	115,00	0,72	497,67	1222,46	1,64	40,71
7,10	2,24	22,61	14,36	114,50	0,72	496,15	1183,43	1,59	41,93
7,10	2,24	22,61	14,68	114,50	0,72	496,15	1209,87	1,62	41,01
6,80	2,11	23,64	14,06	115,50	0,72	488,15	1169,02	1,57	41,76
6,80	2,11	23,64	14,35	113,50	0,72	488,15	1172,55	1,57	41,63
6,70	2,06	23,95	13,85	116,00	0,72	484,41	1156,54	1,55	41,88
6,50	1,98	24,53	13,95	114,00	0,72	475,50	1145,02	1,54	41,53
6,10	1,81	25,53	13,39	114,50	0,72	452,60	1103,60	1,48	41,01
5,90	1,72	25,96	12,86	115,00	0,72	438,98	1065,08	1,43	41,22
5,6	1,60	26,49	12,10	115,00	0,72	416,34	1001,55	1,34	41,57
5,3	1,48	26,92	11,58	117,00	0,72	391,55	975,84	1,31	40,12

Figura 30. Curva potencia – caudal para 3645 RPM.

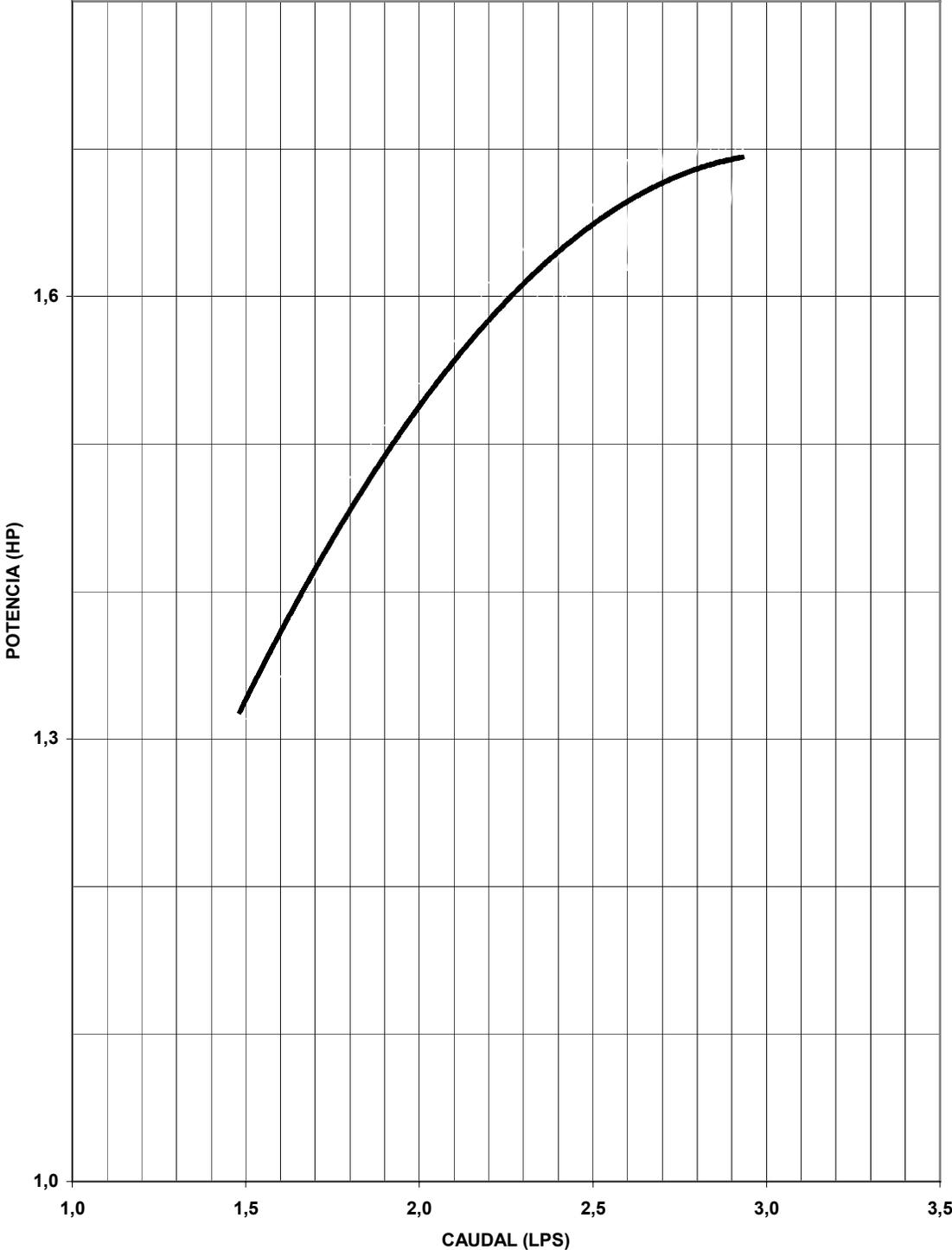
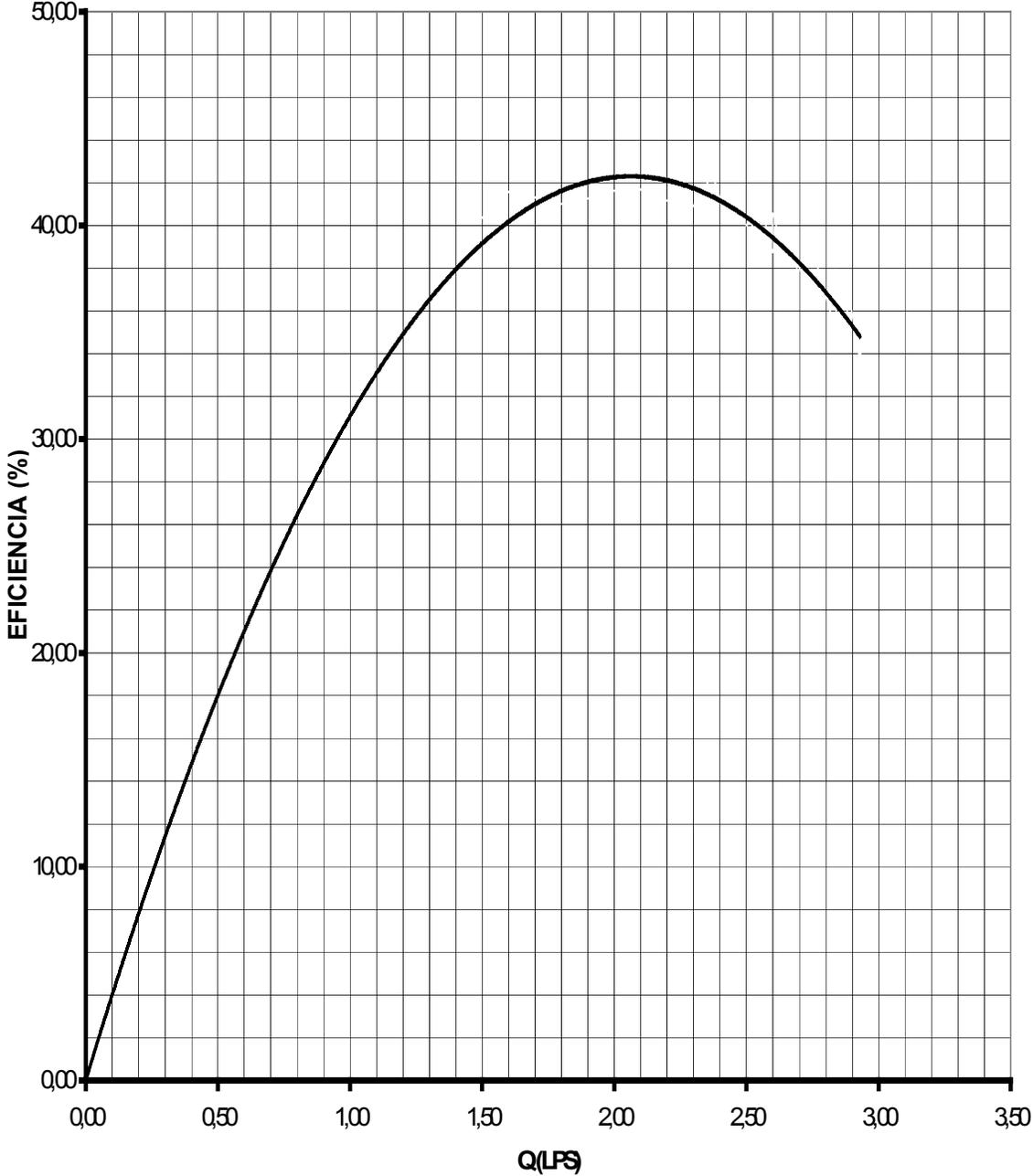


Figura 31. Curva Eficiencia – Caudal para 3645 RPM.



Cuadro 17. Relación Potencia, eficiencia - caudal para 3585 RPM

H. Vert.	CAUDAL	H	I	V	FACTOR	Putil	Pabsorbida	POTENCIA	Rendimiento
(cm)	(lps)	(m)	(amperios)	(voltios)	POTENCIA	(wattios)	(wattios)	(HP)	(%)
8,40	2,83	16,50	20,32	116,00	0,72	458,67	1696,71	2,28	27,03
8,40	2,83	16,50	15,50	117,00	0,72	458,67	1306,06	1,75	35,12
8,40	2,83	16,50	17,11	116,50	0,72	458,67	1434,83	1,92	31,97
8,40	2,83	16,50	19,13	112,00	0,72	458,67	1542,80	2,07	29,73
8,30	2,79	17,07	15,35	116,50	0,72	466,63	1287,92	1,73	36,23
8,30	2,79	17,07	15,27	115,00	0,72	466,63	1264,36	1,70	36,91
8,20	2,74	17,62	15,61	116,50	0,72	473,63	1308,95	1,76	36,18
7,90	2,60	19,18	15,31	116,50	0,72	489,17	1284,48	1,72	38,08
7,60	2,46	20,59	15,53	116,50	0,72	497,20	1302,52	1,75	38,17
7,50	2,42	21,02	15,38	116,50	0,72	498,35	1289,86	1,73	38,64
7,20	2,28	22,24	14,67	116,50	0,72	497,67	1230,35	1,65	40,45
7,20	2,28	22,24	14,98	116,50	0,72	497,67	1256,10	1,68	39,62
6,70	2,06	23,95	14,87	116,50	0,72	484,41	1246,92	1,67	38,85
6,70	2,06	23,95	15,26	116,50	0,72	484,41	1280,01	1,72	37,84
6,00	1,77	25,75	14,78	117,00	0,72	445,95	1244,79	1,67	35,83
5,20	1,44	27,04	14,44	117,00	0,72	382,90	1216,76	1,63	31,47

Figura 32. Curva potencia caudal para 3585 RPM.

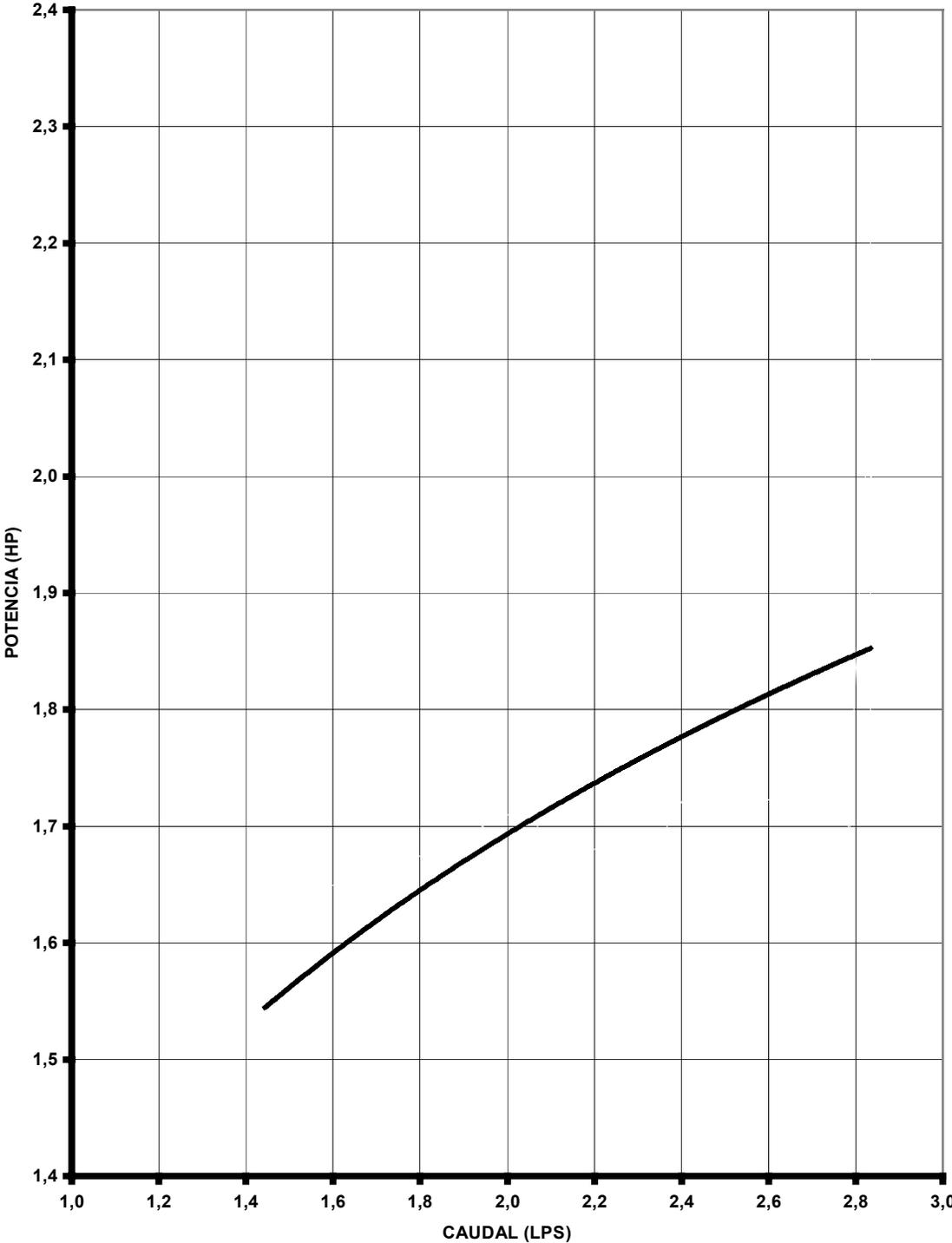
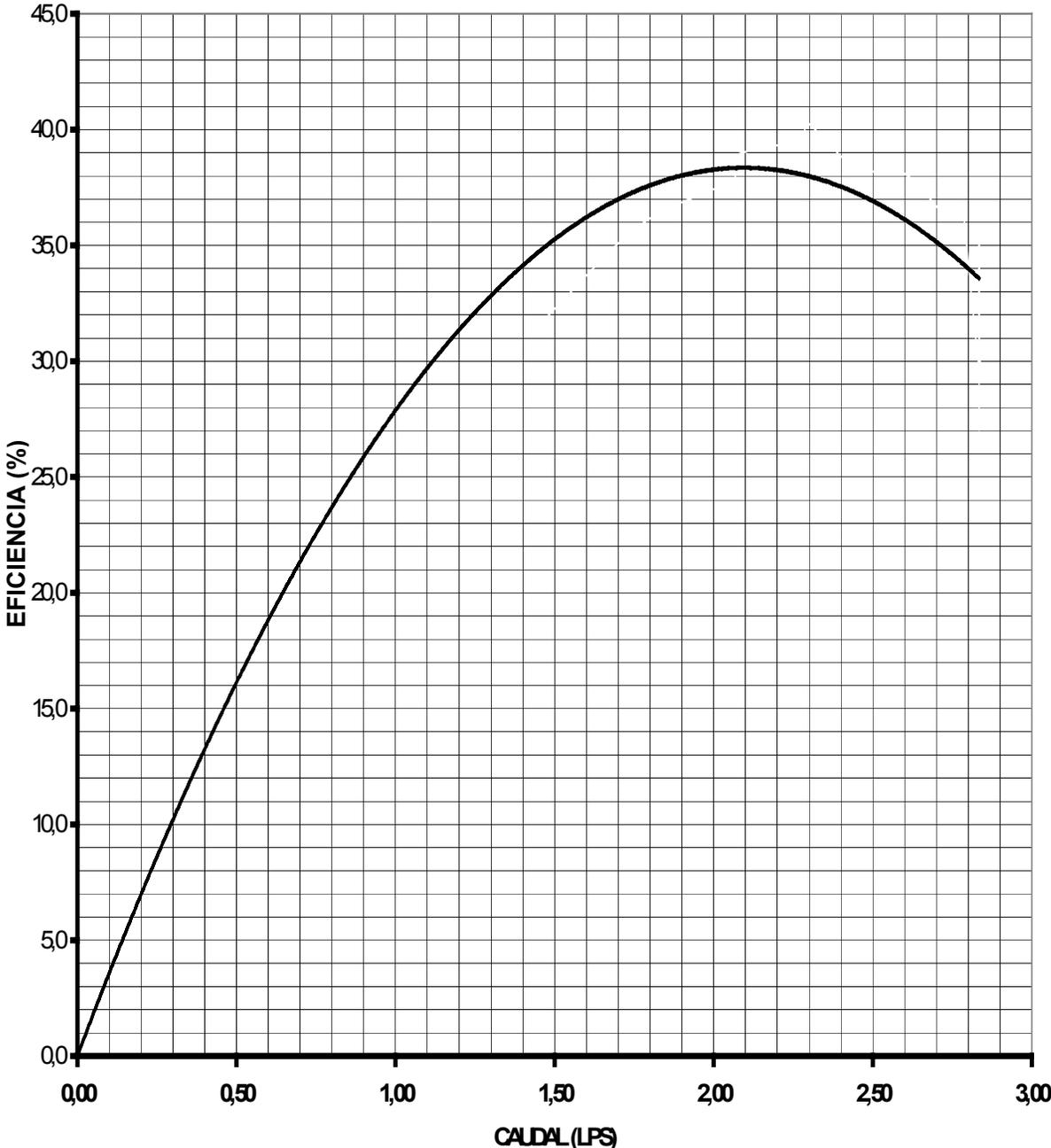


Figura 33. Curva Eficiencia – Caudal para 3585 RPM.



6. INSTALACION

Las bombas centrífugas son máquinas sencillas y no precisan de unas condiciones especiales para su puesta en marcha, aunque si es obligado tomar determinadas precauciones para su funcionamiento.

La bomba deberá ser colocada de manera que sea fácilmente accesible para inspección durante la operación. Es conveniente que la bomba este ubicada tan cerca como sea posible de la fuente de succión, para que las pérdidas de carga y elevación sean mínimas.

La ubicación de la bomba será la adecuada con vistas a obtener el máximo NPSH disponible, situándola lo más cerca posible del nivel inferior del líquido.

El funcionamiento de las bombas centrífugas es muy seguro y silencioso, para ello es necesario que la base esté realizada de manera que evite vibraciones que den origen a desplazamientos de bomba o motor.

La exacta alineación de la bomba con su eje de accionamiento es esencial para su buen funcionamiento cualquiera que sea el tipo de acoplamiento utilizado.

Una mala alineación de la bomba daría lugar a graves desgastes en el interior de la misma. Además, debe volverse a comprobar la alineación después que a la bomba le han sido fijadas las uniones de las tuberías.

Las tuberías deben soportarse independientemente de la bomba para evitar esfuerzos o tensiones sobre la carcasa de la bomba durante su funcionamiento. Se debe procurar que la bomba no tenga que soportar el peso de la tubería.

Las universales en la succión y descarga son importantes porque se acopla o desacopla rápidamente la bomba en caso requerido, como cuando se efectúan reparaciones o se desmonta la bomba.

- **TUBERÍA DE SUCCION:**

La mayoría de los problemas de bombeo se deben a un mal diseño de las tuberías de succión y a las malas condiciones de la succión misma.

El principal problema que puede aparecer en una instalación es que en el conducto de succión no se cumplan las condiciones necesarias de NPSH para un buen funcionamiento de la bomba, siendo necesario verificar tal valor en el cual el NPSH disponible debe ser mayor o igual al NPSH requerido. Si el NPSH es insuficiente, la bomba cavitará, su funcionamiento será ruidoso, la altura y el caudal serán reducidos y el rendimiento, por consiguiente será malo.

El buen funcionamiento de las bombas depende en gran parte del diseño de la tubería de succión que debe ser recta, lo más corta posible y que evite las entradas de aire por juntas, y que sea colocada de manera que no lleve puntos altos que retengan bolsas de aire que provocarían perturbaciones.

Se debe procurar en todos los casos que la altura entre el centro de la bomba y el nivel más bajo que necesite para toma de líquido no sea superior a 5 metros a nivel del mar o 4 metros en alturas mayores a 100 msnm. De esta forma se procede a calcular la presión atmosférica en m de columna de agua quitándole a este valor los metros de pérdida por rozamiento y accesorios en la tubería.

Se debe usar en la tubería de succión un diámetro como mínimo igual al de entrada de succión de la bomba. No permitir nunca que se reduzca ese diámetro. Es más conveniente usar tubería de mayor diámetro.

Si la tubería de succión es demasiado larga, se utiliza tubería de diámetro mayor respecto al de la bomba y para esto se utilizan reductores excéntricos conectando la entrada de la bomba, y colocados en el lado recto hacia arriba, para evitar la formación de bolsas de aire en la línea de succión.

Usar una válvula de pie cuando la bomba no sea autocebante y cuando la succión sea negativa.

- **TUBERÍA DE IMPULSIÓN:**

Es necesario una válvula de paso, que será de compuerta, irá montada a la salida de la bomba para regular el caudal al valor deseado y evitar, en un caso dado la sobrecarga del motor de accionamiento. Dicha válvula sirve para regular el paso del agua a través de esta tubería.

Se debe usar diámetro de tubería como mínimo de igual diámetro que la descarga. Colocar los accesorios que faciliten el cebado.

Las instalaciones de bombeo incluyen algunos aparatos para controlar los diferentes parámetros de funcionamiento como son la capacidad, presión, potencia.

- **MEDIDA DE PRESION:**

Para presiones bajas y preferiblemente para vacíos, se utilizan manómetros en U.

Para medir la altura de la bomba y para controlar la presión del agua en el funcionamiento de bombas se utilizan manómetros tipo Bourdon.

- **MEDIDA DE CAUDAL:**

La medida del caudal será realizada con un vertedero rectangular de pared delgada.

- **MEDIDA DE LA POTENCIA:**

Para medir la potencia de las bombas centrífugas se pueden utilizar dos métodos los cuales son muy precisos, estos son:

- Método directo.
- Método indirecto.

- **Métodos directos:**

Consisten en acoplar un tubo de torsión (dinamómetro de torsión) entre la bomba y el accionamiento, de esta forma puede medirse directamente la potencia absorbida mediante la velocidad de giro y el par de torsión.

El inconveniente de este procedimiento es su alta tecnificación y su alto nivel de averías.

- **Método indirecto:** Presupone que la potencia absorbida por el accionamiento se mide y la potencia absorbida por la bomba centrífuga se halla teniendo en cuenta el rendimiento del motor de accionamiento. Este método se usa sobre todo para motores eléctricos.

- **MEDICION DE LA VELOCIDAD DE GIRO:**

Existen en el mercado diferentes métodos para medir la velocidad de giro, pudiendo citarse los siguientes:

- Tacómetros manuales: Se colocan en el taladro del extremo libre del eje de la máquina.
- Transmisores inductivos o de impulsores ópticos: En los que la señal de medida es indicada mediante un contador electrónico.
- Medidores del deslizamiento: Indican el deslizamiento entre la velocidad de sincronismo y la velocidad real que es una función de la carga de los motores asíncronos.

- **OTROS EQUIPOS DE MEDIDA:**

En las grandes instalaciones de bombas centrífugas se puede aplicar, en casos especiales, equipos para medir el empuje, la vibración, la tolerancia de los rodamientos, la temperatura, etc. Estos equipos por su complejidad suelen estar adaptados a las necesidades específicas de cada instalación.

7. MANUAL DE LABORATORIO

DETERMINACION DE LAS CURVAS CARACTERISTICAS DE UNA BOMBA CENTRIFUGA

7.1 OBJETIVOS.

7.1.1 GENERALES.

Al finalizar el desarrollo del laboratorio, el estudiante conocerá las relaciones existentes entre los diferentes parámetros que intervienen tanto en el funcionamiento del banco de pruebas como en el trazado de las curvas de operación de una bomba centrífuga.

7.1.2 ESPECIFICOS.

El grupo de estudiante visualizará y experimentará el proceso de conversión de la energía mecánica en energía dinámica y estática al fluido para lo cual deberá tomar los datos de la práctica y el trazado de las siguientes gráficas:

- Relación entre caudal y altura para varias velocidades de la bomba.
- Relación entre la potencia absorbida y el caudal para varias velocidades.
- Relación de la eficiencia de la bomba y el caudal dado.
- Calcular del NPSH necesario para garantizar un correcto funcionamiento en la tubería de succión.

- Encontrar el punto de operación de la bomba.

7.2. MARCO TEORICO

Las bombas centrífugas se caracterizan por ser turbomáquinas hidráulicas del tipo generadoras y facilitan la transferencia energética de la energía mecánica de un eje que hace girar el eje de la bomba produciendo una energía del tipo dinámica y estática en la cual prevalece la estática. Esta última energía se presenta como la capacidad que tiene la bomba de impulsar o dar presión al fluido. Las bombas centrífugas son utilizadas para elevar fluidos a grandes alturas con caudales relativamente pequeños, por tal razón tienen su mayor utilización en edificaciones de gran altura, y en sistemas de bombeo con grandes diferencias entre los niveles de succión y el de descarga.

7.2.1 Obtención curva caudal – altura:

Es importante tener claros los conceptos básicos para la obtención de las curvas características. Primero explicamos la manera de obtener la curva característica de la tubería la cual viene dada por la relación de la altura dinámica vs caudal de una curva que es semejante a una parábola y luego la obtención de la curva característica del modelo en sí.

- **Curva característica de la tubería:**

Para la obtención de esta curva es necesario conocer la diferencia entre la altura estática de elevación y la altura dinámica de elevación. La altura estática de elevación está dada por la diferencia de cotas entre al succión y la impulsión. La altura dinámica de elevación está representada por las pérdidas de altura en la tubería, las cuales varían proporcionalmente al cuadrado de la velocidad de un modo aproximado.

La curva de capacidad de carga para una velocidad constante de la bomba, nos da las diferentes cantidades de agua suministradas por la bomba al vaciar la carga.

El sistema digital que está instalado en el banco de pruebas hace que se pueda controlar la bomba para que trabaje a una velocidad determinada. Es decir, para cada ensayo podemos variar las revoluciones de la bomba.

Se utiliza una válvula de compuerta abierta instalada en la tubería de impulsión para poder hacer la variación del caudal. La medición del caudal se la realiza con el vertedero rectangular instalado en el tanque de carga y descarga. La lectura para la medición del caudal se efectúa en la escala del vertedero.

Luego, la relación altura dinámica vs caudal nos da una curva semejante a una parábola.

- **Curva característica del modelo:**

Para obtener esta curva se plantea teorema de Bernoulli entre los puntos de la tubería de succión y la tubería de impulsión.

$$P_s / \gamma + V_s^2 / 2g + Z_s = P_d / \gamma + V_d^2 / 2g + Z_d - H_b + H_f.$$

$$H_b = (P_d - P_s) / \gamma + (V_d^2 - V_s^2) / 2g + (Z_d - Z_a) + H_f.$$

Donde:

H_b = altura de elevación de la bomba.

P / γ = diferencia de presión entre los puntos de succión e impulsión.

$(V_i^2 - V_s^2) / 2g$ = diferencia de velocidad entre la succión e impulsión.

$(Z_i - Z_s)$ = diferencia de altura entre los puntos de succión e impulsión.

H_f = pérdida de presión por fricción y accesorios entre succión e impulsión.

Se hace funcionar la bomba hasta que se estabilice. Con el sistema digital se fija el voltaje para mantener las revoluciones por minuto constantes. El caudal se lo mide por medio de las lecturas en la escala del vertedero.

Para hallar la diferencia de presión entre los puntos de la tubería de succión y de impulsión, se realiza mediante la lectura en los manómetros.

NOTA:

El punto de intersección de estas dos curvas caracteriza el estado instantáneo de funcionamiento de la bomba.

7.2.2 Obtención curva potencia – eficiencia vs caudal

La curva de potencia determina la cantidad de fuerza o energía necesarias para accionar la unidad.

La curva de eficiencia muestra la cantidad de trabajo aprovechable de la unidad suministrada al eje de la bomba.

- **Potencia Útil:**

La potencia útil de una bomba centrífuga, es el producto de la altura real desarrollada por la bomba (altura manométrica) por el peso específico del líquido y por el caudal que bombea. Lo anterior se lo divide entre 75 para que quede dimensionado en hp o entre 367 para representarlo en Kw.

$$P_u = (Q * H * \gamma) / 75 = HP$$

Para expresar la potencia útil en wattios:

$$P = (Q * H * \gamma) * 9,81$$

Donde:

Q = Caudal, en m³/seg.

H = Altura, en metros.

γ = Peso específico, en Kg/m³.

- **Potencia absorbida:**

La potencia absorbida es la potencia entregada por el motor. Para calcular ésta potencia se miden los kilowattios consumidos por el motor.

Para obtener la curva potencia absorbida – caudal, se mide el voltaje y amperaje, se mantiene constantes las revoluciones esto con la ayuda del sistema digital. Se mide el caudal.

Se utiliza un manómetro a la salida de la bomba para la potencia útil midiendo las alturas y el caudal.

La relación entre potencia útil y potencia absorbida da la eficiencia.

7.3 DESCRIPCION DEL EQUIPO

El banco de prueba se compone de:

- Una bomba centrífuga marca IHM motor WEG de 1 hp, con diámetro de succión e impulsión de 1½". Las revoluciones de la bomba son de 3645 RPM. Con el sistema digital se pueden variar las revoluciones de la bomba para la realización de diferentes ensayos.

- Un sistema cerrado de circulación de agua (tanque de carga y descarga), con una cámara de quietamiento para la regulación del flujo, un vertedero rectangular con escala graduada para la determinación del caudal en litros/minuto.
- Un sistema digital para la medición de voltaje, amperaje y las revoluciones en la unidad de tiempo (rpm).
- Un manómetro de mercurio para medir la presión en la succión.
- Un manómetro de glicerina de 0 – 60 psi para medir la presión en la descarga.
- Una válvula de compuerta para la variación del caudal.
- Tubería y accesorios necesarios para el correcto funcionamiento del banco de pruebas.

7.4 PROCEDIMIENTO:

Antes de proceder a la realización de las pruebas, el estudiante deberá tener en cuenta las siguientes instrucciones:

- Proceda a llenar el tanque con agua mediante una manguera auxiliar, revise el nivel del agua.
- Debe deslizar la escala, derramar o agregar agua hasta que el nivel del agua esté en 5 cm de la escala que está ubicada en el tanque.
- Verifique las fugas del agua en el sistema.

- Revise si el manómetro instalado en la succión está lleno de mercurio y si éste indica el nivel cero o en su defecto tener en cuenta el desfase que pueda presentar si varía por efectos de la altura sobre el nivel del mar.
- Revise si el sistema digital se encuentra listo para realizar las distintas mediciones y lecturas de acuerdo a los ensayos.
- Una vez se inicie el giro del motor, la bomba enviará el agua, el nivel en el vertedero ascenderá y el caudal se indicará en la escala.
- La presión a la salida de la bomba se indica en el manómetro ubicado en la tubería de descarga.
- El voltaje, amperaje y las revoluciones en la unidad de tiempo se medirán en el sistema digital.

7.5 DESARROLLO DE LA PRUEBA:

Durante el desarrollo de la prueba los estudiantes deberán estar ubicados en las siguientes posiciones.

- Un estudiante deberá estar constatando las rpm que se miden en uno de los multímetros del sistema digital.
- Un estudiante leerá la presión en la succión en el manómetro de mercurio.
- Un estudiante leerá en el manómetro de glicerina la presión de la columna de agua a la descarga de la bomba y abrirá y cerrará la válvula en la tubería de descarga para la variación del caudal.

- Un estudiante leerá la medición del caudal a través del vertedero en la regla graduada.
- Un estudiante tomará los datos para las diferentes pruebas.

NOTA:

Para cada prueba se hacen varios ensayos realizando los mismos pasos descritos anteriormente.

7.6 TABLA DE DATOS Y CALCULOS (Ver cuadro 18).

7.7 INFORME DE LABORATORIO.

7.7.1 Curva caudal – altura:

- Para cada caudal determine los parámetros de la ecuación de Bernoulli entre los puntos de la succión y la descarga. Encuentre la altura de elevación correspondiente.
- Dibuje la curva caudal – altura de la bomba y compárela con la curva dada en el modelo.
- Con la altura estática correspondiente dibuje la curva característica de la tubería y encuentre el punto de operación de la bomba.

7.7.2 Curva potencia, eficiencia vs caudal:

- Definir los conceptos básicos para la obtención de esta curva como son: potencia útil, potencia absorbida y rendimiento.

- Con los datos medidos y obtenidos en el sistema digital, calcule la potencia absorbida.
- Dibuje la curva de potencia absorbida vs caudal.
- Calcule la potencia útil para los caudales anteriores (usar la curva característica de la bomba).
- Calcular el rendimiento o eficiencia teniendo en cuenta la potencia útil y la potencia absorbida y dibuje la curva eficiencia vs caudal.
- Como análisis de resultados determine los valores de caudal, potencia y eficiencia a los cuales usted pondría a trabajar a esta bomba.
- Recomendaciones.
- Conclusiones.
- Bibliografía

8. CONCLUSIONES

1. El tanque de aforo y sus partes funcionan eficientemente, proporcionando la carga que se necesita para accionar el sistema y realiza el aquietamiento del flujo necesario para hacer las lecturas en la regla.
2. Para medir la presión en la succión se utilizó un manómetro diferencial de mercurio para obtener mayor precisión. En la impulsión se utilizó un manómetro tipo Bourdon ya que las presiones son altas, siendo muy útil el de este tipo.
3. Los diámetros de la tubería instalada en el sistema 1½ pulgadas en la succión y 2 pulgadas en la descarga, son los más óptimos ya que las pérdidas totales son muy bajas garantizando así un correcto funcionamiento del banco de pruebas.
4. Para una velocidad del motor de 3645 rpm la bomba suministra un caudal óptimo de 3 lps a una altura de 2,97 m, que al comparar con el de las especificaciones de la bomba que es de 2,52 lps suministran caudales aproximados.
5. Para una velocidad del motor de 3585 rpm la bomba suministra un caudal óptimo de 2,94 lps a una altura de 2,27 m, que al comparar con el de las especificaciones de la bomba que es de 2,52 lps suministran caudales aproximados.
6. Como el NPSH disponible es mayor que el NPSH requerido, se garantiza un adecuado funcionamiento del sistema evitando además el fenómeno de la cavitación.

7. Según el valor del NPSH disponible, la bomba se debe instalar máximo a 6,81m por encima del nivel de agua en el tanque de suministro para así evitar problemas en la línea de succión y en el sistema en general.
8. La cantidad de trabajo aprovechable por la bomba o eficiencia, de acuerdo a las curvas características no proporcionan un porcentaje alto en el sistema.
9. La variación del voltaje es muy poca, mientras que el amperaje varia en pequeñas proporciones, pero en los ensayos realizados tienden a ser constantes y se diferencian en rangos mínimos debido a que los cálculos de los diámetros de la tubería fue el más óptimo obteniendo pérdidas por fricción muy bajas.
10. Al realizar las curvas características del banco de pruebas y analizando las curvas proporcionadas por el fabricante, se puede constatar que la altura geométrica en cada una de estas curvas la variación no es muy considerable.

9. RECOMENDACIONES

1. Para encontrar las pérdidas por fricción se recomienda utilizar la fórmula de Hazen & Williams, que es la aconsejable para diámetros mayores a 2 pulgadas. Recomendamos utilizar otras fórmulas para el cálculo de estas pérdidas como por ejemplo la de Darcy y la de Colebrook para el factor de fricción.
2. Antes de realizar cada ensayo, revisar el nivel de agua en la regleta ubicada en el tanque que es de 5 cm llenando o sacando agua del mismo.
3. Revisar si el manómetro diferencial contiene mercurio y tener en cuenta el desfase antes de comenzar a tomar las presiones en la succión, así mismo verificar si la escala del manómetro tipo Bourdon está en ceros.
4. Se recomienda mirar si no se presentan fugas en el banco de pruebas que puedan afectar los ensayos y la toma de datos.
5. Antes de comenzar con los ensayos verificar que la válvula de compuerta esté totalmente abierta.
6. Realizar varios ensayos variando las revoluciones del motor, para así tener varios puntos de operación y analizando sus resultados.
7. Cuando se realiza el ensayo es recomendable tener encendido el sistema durante un lapso de 45 minutos para cada variación de la velocidad del motor.
8. La toma de lecturas para cada ensayo se debe realizar de 0 a 40 psi, obteniendo por lo menos de 20 a 25 lecturas.

BIBLIOGRAFIA

AZEVEDO NETTO, J.M y ACOSTA ALVAREZ, Guillermo. Manual de hidráulica. México: Harla, 1975. 315 p.

CASTILLA RUIZ, Antonio y GALVIS CASTAÑO, Gerardo. Bombas y estaciones de bombeo. Cali: Cinara, 1993. 227 p.

CESPEDES, Doris y CALDERON, Alvaro. Manual de laboratorios de mecánica de fluidos e hidráulica. Ibaguè: Universidad del Tolima, 1999. 60 p.

CARNICERO, Royo y MAINAR, Hasta. Bombas centrífugas. Madrid: Paraninfo, 1996. 180 p.

JIMENEZ, Doris y MOLINA, Claudia. Montaje estudio de un modelo didáctico de bombas en serie y en paralelo. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño, 1993. 137 p.

LOPEZ CUALLA, Ricardo. Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. Medellín: Escuela colombiana de ingeniería, 2000. 381 p.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO, Dirección de agua potable y saneamiento básico. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS –2000. Santa fe de Bogotá D.C: Sistemas de acueducto, sección I título B, 2000.

MOTT L, Robert. Mecánica de fluidos aplicada. México: Pearson, 1996. 430 p.

PUENTES LEAL, Gerardo. Principios básicos sobre bombas. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño, 1998. 156 p.

RODRIGUEZ DIAZ, Alfonso. Hidráulica experimental. E.C.I, 2001.

SAAVEDRA, Fernando. Escuela de ingeniería de recursos naturales y del ambiente. Cali: Universidad del Valle, 2001. 180 p.

SALAZAR CANO, ROBERTO. Acueductos. 1 ed. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño, 1998. 336 p.

SOTELO AVILA, Gilberto. Hidráulica general. Volumen 1. México: Limusa, 1998. 350 p.

UNIVERSIDAD DEL VALLE. Bombas centrífugas. Cali: Departamento de mecánica de fluidos y ciencias térmicas, 1997. 10 p.

VEN TE, Chow. Hidráulica de canales abiertos. Santa fe de Bogotá D.C : Mc Graw Hill, 1994. 310 p.