



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA DE TIPO CENTRÍFUGA
CONTROLADA POR ELECTRONIVELES Y UNA BOMBA CON SISTEMA HIDRONEUMÁTICO**

Irwin Giancarlo Herrera Tajtaj

Asesorado por el Ing. José Ismael Véliz Padilla

Guatemala, octubre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA DE TIPO CENTRÍFUGA
CONTROLADA POR ELECTRONIVELES Y UNA BOMBA CON SISTEMA HIDRONEUMÁTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

IRWIN GIANCARLO HERRERA TAJTAJ

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ISMAEL VÉLIZ PADILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres
EXAMINADOR	Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA DE TIPO CENTRÍFUGA CONTROLADA POR ELECTRONIVELES Y UNA BOMBA CON SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 18 de marzo de 2014.



Irwin Giancarlo Herrera Tajtaj

Guatemala 18 de agosto de 2014

Ingeniero
Julio Cesar Campos Paiz
Director de la escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

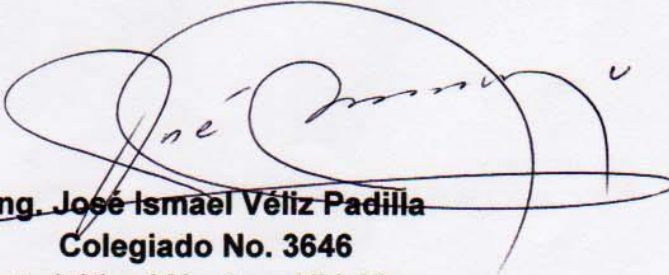
Por este medio me dirijo a usted, para informarle que he llevado a cabo la revisión final de trabajo de graduación titulado, **COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA DE TIPO CENTRÍFUGA CONTROLADA POR ELECTRONIVELES Y UNA BOMBA CON SISTEMA HIDRONEUMÁTICO.** Presentado por el estudiante **Irwin Giancarlo Herrera Tajtaj** carne 200915270.

El trabajo se ha desarrollado de acuerdo con el programa y objetivos iniciales planteados y considero que llena los requisitos para ser aprobado como trabajo de graduación.

Finalmente considero importante resaltar la utilidad que el trabajo tendrá como apoyo a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica en el curso de Máquinas hidráulicas

Agradeciendo la atención a la presente aprovecho la oportunidad de suscribirme de usted.

Atentamente:



Ing. José Ismael Véliz Padilla
Colegiado No. 3646
Catedrático Máquinas Hidráulicas

José Ismael Véliz Padilla
INGENIERO MECÁNICO
COL. 3646



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.233.2014

El Coordinador del Área de Complementaria, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA DE TIPO CENTRÍFUGA CONTROLADA POR ELECTRONIVELES Y UNA BOMBA CON SISTEMA HIDRONEUMÁTICO**. Del estudiante **Irwin Giancarlo Herrera Tajtaj**, recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"



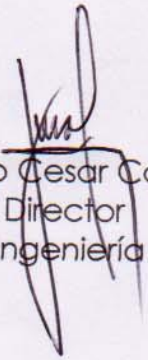
Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador del Área de Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, Septiembre de 2014.

Ref.E.I.Mecanica.277.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Complementaria del trabajo de graduación **COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA DE TIPO CENTRÍFUGA CONTROLADA POR ELECTRONIVELES Y UNA BOMBA CON SISTEMA HIDRONEUMÁTICO**, del Estudiante **Irwin Giancarlo Herrera Tajtaj**, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


MA Ing. Julio Cesar Campos Paz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, Octubre de 2014.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 576.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA DE TIPO CENTRÍFUGA CONTROLADA POR ELECTRONIVELES Y UNA BOMBA CON SISTEMA HIDRONEUMÁTICO**, presentado por el estudiante universitario **Irwin Giancarlo Herrera Tajtaj**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 23 de octubre de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por su infinito amor, sabiduría y fortaleza para poder culminar una meta más en mi vida. Con gratitud en mi corazón por su inmensa bondad, misericordia y bendición inmerecida.
- Mi padre** Ervin Alirio Herrera Pérez, por su apoyo incondicional durante toda mi formación académica, por su digno ejemplo de superación y profesionalismo.
- Mi madre** Mélida Marina Tajtaj Callejas, por sus infinitas oraciones, por ser una guía en mi vida espiritual, por ser un modelo de madre ejemplar y sus atenciones durante todos los arduos años de sacrificio.
- Mi hermano** Brian Jordany Jared Herrera Tajtaj, por su apoyo moral, su compañía y ser uno de los pilares importantes en mi vida.
- Mi novia** Yoselin Rocio Orellana Castillo, por llegar a mi vida y ser mi gran ilusión, por su apoyo en el ciclo final de mi carrera profesional y compartir conmigo momentos que jamás olvidaré.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por darme la oportunidad de ser su hijo y permitirme alcanzar una de las metas más anheladas de mi vida.
- Mis padres** Por su paciencia y su confianza depositada en mí a lo largo de mi vida. Por ser lo más valioso y ejemplar en mi existencia. Estaré toda mi vida en deuda por su infinito apoyo y amor para conmigo.
- Mis amigos** William Alfredo Reyes Gómez, Yonatan David Pérez Zamora, Edgar Antonio Ventura Meza, Imer Javier Molina Recinos, Fredy Roberto Escobar, Ariel Waldemar Girón Chew, por ser de bendición y gran ayuda a lo largo de mi carrera profesional.
- Mis tíos** Roxana Tajtaj, Thelma Tajtaj y Eduardo Meza, por su motivación e inmenso cariño para seguir adelante.
- Mis abuelos** Por su incomparable amor.
- Mis familiares** Porque de alguna u otra forma se preocuparon por mí, que Dios les bendiga.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Las primeras bombas hidráulicas	2
1.2. Uso de bombas hidráulicas y sistemas de bombeo en la antigüedad.....	2
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. ¿Qué es una bomba hidráulica?.....	3
2.2. Partes de una bomba hidráulica	3
2.3. Tipos de bombas hidráulicas	5
2.3.1. Según el principio de funcionamiento	5
2.3.2. Según el tipo de accionamiento.....	6
2.4. Eficiencia de una bomba hidráulica	7
2.4.1. Pérdida de potencia hidráulica.....	7
2.4.1.1. Pérdida de potencia volumétrica	8
2.4.1.2. Pérdida de potencia mecánica	8
2.4.2. Eficiencia volumétrica	8
2.4.3. Eficiencia mecánica	9
2.4.4. Eficiencia interna	9

2.4.5.	Eficiencia total	9
2.5.	Teoría y funcionamiento	9
2.6.	Sistema de bombeo	10
2.6.1.	Sistema de bomba hidráulica de tipo centrífuga controlado por electroniveles.....	11
2.6.2.	Sistema de bomba centrífuga con sistema hidroneumático.....	12
2.6.3.	Punto de operación	13
2.6.3.1.	Combinación con el sistema	14
2.6.3.2.	Consideraciones sobre presión y potencia.....	14
2.7.	Tuberías y accesorios en sistemas hidráulicos	15
2.8.	Pérdidas en sistemas de tuberías	17
2.8.1.	Tipos de flujo	17
2.8.2.	Pérdidas en accesorios y válvulas	19
2.8.3.	Pérdidas en tuberías	21
2.8.4.	Ecuaciones de energía.....	23
2.9.	Depósitos de almacenamiento	25
2.9.1.	Depósitos abiertos.....	25
2.9.2.	Depósitos a presión.....	27
2.10.	Diagrama de conexión y equipo de sistemas de bombeo	28
2.10.1.	Diagrama eléctrico, conexión y equipo de una bomba hidráulica de tipo centrífuga controlada por electroniveles	29
2.10.2.	Diagrama eléctrico, conexión y equipo de una bomba hidráulica de tipo centrífuga con sistema hidroneumático.....	31
2.11.	Variables del sistema eléctrico.....	32
2.12.	Variables del sistema hidráulico	33

2.13.	Medidores eléctricos, mecánicos e hidráulicos.....	34
2.13.1.	Medidores de presión	35
2.13.2.	Medidores de caudal	37
2.13.3.	Medidores eléctricos.....	38
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	39
3.1.	Planteamiento del problema	39
3.1.1.	Definición del problema	39
3.1.2.	Delimitación del problema	40
3.1.3.	Justificación	40
3.2.	Variables.....	40
3.3.	Recursos humanos.....	41
3.4.	Presupuesto	42
3.5.	Recolección de datos	43
3.6.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	46
3.7.	Análisis estadístico	65
4.	RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	67
	CONCLUSIONES	75
	RECOMENDACIONES.....	77
	BIBLIOGRAFÍA.....	79
	ANEXOS	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Funcionamiento de un electronivel.....	12
2.	Diagrama de Moody.....	22
3.	Diagrama de volumen de control.....	23
4.	Diagrama representativo de la ecuación de la energía.....	25
5.	Ejemplo de depósito abierto.....	27
6.	Ejemplo de depósito a presión.....	28
7.	Esquema de funcionamiento de sistema de bombeo controlado por electroniveles.....	29
8.	Diagrama eléctrico de sistema de bombeo controlado por electroniveles.....	30
9.	Esquema de funcionamiento de sistema hidroneumático.....	31
10.	Diseño del equipo e instalación del sistema de bombeo tanque a tanque.....	43
11.	Diseño de equipo e instalación del sistema hidroneumático.....	44
12.	Comparación de la eficiencia de los sistemas.....	68
13.	Balance energético del sistema de bombeo de bomba centrífuga controlada por electroniveles.....	71
14.	Balance energético del sistema hidroneumático.....	72

TABLAS

I.	Pérdidas de carga en válvulas y accesorios.....	20
II.	Principales características de los medidores de presión.....	36
III.	Variables.....	41
IV.	Presupuesto.....	42
V.	Placa de datos bomba centrífuga.....	45
VI.	Placa de datos bomba con sistema hidroneumático.....	45
VII.	Áreas de las tuberías utilizadas en los sistemas de bombeo.....	47
VIII.	Tiempos de llenado para el aforo volumétrico.....	47
IX.	Caudal en bombas hidráulicas.....	48
X.	Velocidad en tuberías del sistema hidráulico.....	49
XI.	Número de Reynolds para tuberías del sistema hidráulico.....	51
XII.	Rugosidad relativa y factores de fricción de tubería.....	52
XIII.	Longitud equivalente de accesorios del sistema hidráulico.....	54
XIV.	Longitud total de tubería y accesorios.....	55
XV.	Pérdidas totales en tuberías y accesorios.....	56
XVI.	Consumo eléctrico de bombas por mes.....	64
XVII.	Eficiencia experimental de bomba centrífuga controlada por Electroniveles.....	67
XVIII.	Eficiencia experimental de bomba con sistema hidroneumático.....	67
XIX.	Eficiencia teórica y experimental.....	68
XX.	Costo de montaje de sistema hidroneumático.....	69
XXI.	Costo de montaje de sistema tanque a tanque.....	70
XXII.	Costos de operación.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Aceleración de la gravedad
Z	Altura de elevación
Amp	Amperio
HP	Caballo de fuerza
H_b	Carga total
Q	Caudal
C	Consumo energético
C_c	Costo por consumo
ρ	Densidad
D	Diámetro
μ	Eficiencia
E_v	Energía cinética
E_p	Energía estática
E_i	Energía interna
E_m	Energía mecánica
E_q	Energía potencial
E_h	Energía térmica
°C	Grados Celsius
°	Grado sexagesimal
H_o	Horas de operación
kW	Kilovatio
kW-h	Kilovatio-hora
P.S.I.	Libra por pulgada cuadrada

L	Longitud
Re	Número de Reynolds
f	Parámetro adimensional de fricción
Pa	Pascal
H_f	Pérdidas por fricción
H_L	Pérdida total de carga
γ	Peso específico
π	Pi
C.P.V.C.	Policloruro de vinilo clorado
%	Porcentaje
P_E	Potencia eléctrica
P_{em}	Potencia eléctrica media
P_H	Potencia hidráulica
P_T	Potencia teórica
P	Presión
P_{lg}	Pulgada
r	Radio
R.P.M.	Revoluciones por minuto
ε	Rugosidad absoluta
ε_r	Rugosidad relativa
T_q	Tarifa monetaria
W	Vatio
V	Velocidad
ν	Viscosidad
Vol	Volumen

GLOSARIO

Acometida	Conjunto de elementos interconectados de tubería para la distribución ecuánime de agua en instalaciones sanitarias.
Adimensional	Número puro que permite describir una característica física sin dimensión ni unidad de expresión.
Aforo Volumétrico	Medición de pequeños caudales que se realiza midiendo el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido.
Álabe	Paleta curva de una turbo máquina o máquina de fluido roto dinámica.
Émbolo	Mecanismo utilizado en las bombas de desplazamiento positivo para la impulsión del fluido dentro de una cámara.
Energía cinética	Energía que posee un cuerpo o masa debido a su movimiento.
Energía potencial	Energía mecánica asociada a la posición o configuración de un cuerpo.

Estanqueidad	Propiedad que posee el material de una superficie sólida, que imposibilita toda clase de fugas en un volumen fijo.
Estopero	Empaquetadura que sella el vástago que permite el cierre en una válvula.
Fluido Incompresible	Fluido cuya densidad siempre permanece constante con el tiempo, y tiene la capacidad de oponerse a la compresión del mismo bajo cualquier condición.
Fricción	Fuerza de contacto que actúa para oponerse al movimiento deslizante entre superficies.
Golpe de ariete	Choque violento que se produce sobre las paredes de un conducto forzado, cuando el movimiento líquido es modificado bruscamente.
Hidrodinámica	Parte de la hidráulica que estudia los fluidos en movimiento.
Hidrostática	Rama de la mecánica de fluidos o de la hidráulica que estudia los fluidos en estado de equilibrio
Líquido inmiscible	Fluido que no puede mezclarse en forma homogénea con otro.
Noria	Máquina hidráulica que sirve para extraer agua siguiendo el principio del rosario hidráulico.

Par torsor

Momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia.

Viscosidad

Propiedad de los fluidos que mide la resistencia de los líquidos a desplazarse libremente, debida a las fuerzas de cohesión moleculares.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó un estudio comparativo entre la eficiencia, costo de montaje y costo de operación de dos sistemas de bombeo, con el fin de obtener información necesaria para la eficaz selección de cualquiera de estos.

Previo al análisis se eligió premeditadamente la potencia de las bombas que se iban a utilizar, seleccionándose bombas de potencia baja para uso comercial y domiciliario, aplicándose el diseño a domicilios de entre 1 y 3 niveles.

Se realizaron las pruebas pertinentes, haciéndose un análisis experimental para cada sistema de bombeo a comparar, obteniéndose una eficiencia teórica y una experimental. Luego se procedió a hacer un análisis de costo de montaje y operación para cada sistema de bombeo, asimismo, un balance energético para cada sistema, determinando las pérdidas que produce cada elemento que compone la instalación hidráulica.

Como resultado del análisis al cual fueron sometidos los sistemas de bombeo, se determinó que la bomba centrífuga controlada por electroniveles es más eficiente y energéticamente más rentable, en cuanto al costo de operación y eficiencia que representa el conjunto motor-bomba. Siendo el costo de operación el factor de mayor consideración en el análisis, para así obtener un ahorro anual hasta de Q. 305,90 al tener un sistema de bombeo controlado mediante electroniveles, para baja potencia.

OBJETIVOS

General

Realizar un estudio comparativo de la eficiencia de una bomba hidráulica de tipo centrífuga controlada por electroniveles, y una bomba con sistema hidroneumático para determinar la mejor elección bajo las mismas condiciones de trabajo.

Específicos

1. Determinar experimentalmente la eficiencia de la bomba hidráulica de tipo centrífuga controlada por electroniveles.
2. Determinar experimentalmente la eficiencia de la bomba hidráulica con sistema hidroneumático.
3. Comparar la eficiencia teórica y experimental de los dos sistemas.
4. Calcular los costos de operación y montaje de las mismas, realizando un balance energético para cada sistema.

INTRODUCCIÓN

En la industria guatemalteca, así como también en comercios y residencias es necesario tener a disposición el agua potable las veinticuatro horas del día, para regulación de la higiene y confort de los diferentes recintos, desde una residencia hasta una institución o industria. Es por ello, que resulta necesario la utilización de sistemas de bombeo de agua para poder tener disponibilidad del vital líquido.

En Guatemala debido a la falta de agua que se sufre a nivel nacional, las personas deben construir cisternas para poder almacenar el vital líquido, ya que las empresas que lo distribuyen no pueden prestar el servicio durante todo un día hacia las residencias de las personas, y de esta manera los guatemaltecos se ven en la necesidad de instalar en sus domicilios sistemas de bombeo de agua.

El presente trabajo tiene como objetivo hacer un análisis comparativo de la eficiencia de dos sistemas de bombeo utilizados en Guatemala, los cuales constituyen bombas hidráulicas de tipo centrífuga. El primer sistema a analizar es el sistema de bombeo controlado por electroniveles y se comparará con el sistema controlado por medio de presostatos, conocido comúnmente como sistema hidroneumático. Se realizará una comparación mecánica de la eficiencia de los dos sistemas y así se podrá tener un criterio energético y operacional de los mismos.

1. ANTECEDENTES

Guatemala es un país que en el pasado ha gozado de no poseer problemas de agua, ya que el recurso hídrico y la baja contaminación eran suficientes para dotar a poblaciones y comunidades enteras del vital líquido. Debido al crecimiento demográfico, el cambio climático y otros factores adversos, Guatemala empieza a tener problemas de agua, en la actualidad 24 % del territorio nacional es árido y muy árido. A lo largo de todo el territorio nacional no se cultiva el agua, no hay presas, tampoco sistemas de captación, toda el agua se pierde en el mar y países vecinos, el país está pasando de ser un país de abundancia a un país deficitario.

Debido al déficit, las municipalidades han recurrido a la perforación de pozos, para extracción del vital líquido del manto freático y asimismo, los usuarios se han visto en la necesidad de la construcción de sistemas de almacenamiento y bombeo para poder tener acceso al servicio todo el tiempo necesario para una eficiente disponibilidad y distribución de agua en cualquier recinto donde interactúen seres vivos.

Es por ello que desde la antigüedad se ha recurrido a la invención de máquinas hidráulicas para transporte y distribución del vital líquido, aumentando la eficiencia de estas con el pasar de los años, hasta la creación actual de equipos y sistemas de bombeo. La mejor manera de utilizar el recurso hídrico en una instalación es teniendo el equipo adecuado para su uso, incluyendo bombas, accesorios, contadores, medidores, etc.

1.1. Las primeras bombas hidráulicas

Una de las primeras bombas conocidas fue inventada por Arquímedes y se conoció como tornillo de Arquímedes en el siglo III A. C., al igual que la bomba denominada jeringa diseñada por los egipcios utilizada en el siglo II A. C.; en el siglo XII Al-Jazari propuso el diseño diferentes tipos de bombas, incluyendo bombas reversibles, bombas de doble efecto, bombas de vacío, bombas de agua y bombas de desplazamiento positivo. Posteriormente fue la invención de la rueda hidráulica y el molino de viento que sufragó la necesidad del transporte de fluidos mediante la hidromecánica.

1.2. Uso de bombas hidráulicas y sistemas de bombeo en la antigüedad

A mediados del siglo XV Leonardo da Vinci en sus textos sobre el flujo de fluidos y estructuras para ríos, relató acerca de sus experiencias en la construcción de instalaciones hidráulicas realizadas principalmente en Milán y Florencia. En 1612 Galileo Galilei realizó el primer estudio de la hidrostática y sus fundamentos. En Mesopotamia fue creada la primer bomba y un sistema de bombeo típico, cerca del año 3000 A. C. Utilizaron una leva de madera al lado del tanque de agua, con un contrapeso en un extremo y un recipiente en el otro. Cuando la palanca se empujaba hacia abajo, el contrapeso hacía subir el balde y se vaciaba en un tanque de almacenamiento de mayor capacidad.

2. MARCO TEÓRICO

En la industria y en la agricultura se presentan con mucha frecuencia problemas de transporte de líquidos a través de sistemas de tuberías, debiendo vencer presiones y desniveles, que hacen necesario el empleo de máquinas hidráulicas denominadas bombas.

2.1. ¿Qué es una bomba hidráulica?

La función principal de una bomba centrífuga es la de mover un fluido, generalmente un líquido de un lugar a otro. Para lograrlo la bomba le agrega energía al fluido. Una bomba hidráulica es una máquina que transforma la energía mecánica en energía hidráulica. En el sentido más amplio del término, una bomba hidráulica es una máquina que trabaja con un fluido incompresible en la que se produce una transformación de energía mecánica en hidráulica.

2.2. Partes de una bomba hidráulica

Las bombas hidráulicas de tipo centrífuga tienen diferentes elementos que realizan la función de elevar la presión del fluido de trabajo, dentro de los más importantes se pueden mencionar:

- Casco o carcasa

Se encarga de guiar el líquido hacia el impulsor, posteriormente recoge el líquido del impulsor reduciendo su velocidad transformando parte de ella en presión.

- Impulsor

Está formado por una serie de álabes, que giran dentro de una cámara circular de la bomba. El impulsor imparte energía al fluido mediante la acción de las aspas, es el único elemento de la bomba que entrega energía al fluido. El impulsor está acoplado al eje del motor eléctrico que entrega el par torsor.

- Difusor

Está formado por álabes fijos divergentes, que al incrementarse la sección circular de la carcasa, reducirá de manera considerable la velocidad del fluido, convirtiendo así la energía cinética en presión, aumentando rápidamente el rendimiento de la bomba.

- Eje

Es una pieza cilíndrica de sección circular no uniforme, que se acopla rígidamente al impulsor de la bomba y le transmite el par torsor directamente del elemento motor.

- Sello mecánico

Es un elemento de estanqueidad situado entre el eje rotante y la parte fija de la bomba. Su función principal es encargarse de la inexistencia de fugas, la reducción de fricción que evita el desgaste del eje y por consiguiente la pérdida de potencia, la disminución en los tiempos y costos de mantenimiento.

2.3. Tipos de bombas hidráulicas

La clasificación de las bombas hidráulicas en general viene definido mediante dos grupos, los cuales son:

2.3.1. Según el principio de funcionamiento

La principal clasificación de las bombas se establece examinando el principio de funcionamiento en el que se fundamentan:

- Bombas de desplazamiento positivo, en las que el principio de funcionamiento está asentado en la hidrostática, de manera que el aumento de presión se realiza por el empuje o compresión de las paredes de las cámaras que varían su volumen constantemente. Este tipo de máquinas hidráulicas también pueden subdividirse en:
 - Bombas de émbolo, en las que existe una o varias cámaras volumétricas fijas, pero su volumen varía por la acción de un émbolo o pistón. En estas máquinas, el movimiento del fluido es variable y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que se abren y cierran sincronizadamente.
 - Bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas, en las que una masa determinada de fluido es succionada en una o varias cámaras que se desplazan desde la línea de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión) de la bomba.

- Bombas rotodinámicas, en las que el principio de funcionamiento está establecido en la reciprocidad de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, utilizando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios discos rígidos con álabes que giran formando un campo de presiones en el fluido. En este tipo de bombas el flujo del fluido es constante. Estas turbomáquinas hidráulicas también pueden subdividirse en:
 - Radiales o centrífugas, cuando el movimiento del fluido forma un ángulo recto con respecto al eje del rodete impulsor.
 - Axiales, cuando el fluido atraviesa los canales de los álabes siguiendo una trayectoria proyectada por el cilindro.
 - Helicocentrífugas o diagonales, cuando el recorrido del fluido se establece en dirección entre el cilindro y el rodete impulsor, es decir, en un cono coaxial con el eje del rodete.

2.3.2. Según el tipo de accionamiento

Según el tipo de accionamiento, las bombas hidráulicas también pueden tipificarse de la siguiente manera:

- Electrobombas son aquellas impulsadas por el par torsor generado mediante un motor eléctrico, para diferenciar de las motobombas, regularmente accionadas por motores de combustión interna.
- Bombas neumáticas, que son bombas de desplazamiento positivo en las que la energía de que impulsa el émbolo es a partir de aire comprimido.

- Bombas de accionamiento hidráulico, un claro ejemplo es la bomba de ariete o la noria utilizada en la antigüedad.
- Bombas manuales, un ejemplo típico de bomba manual es la bomba de balancín.

2.4. Eficiencia de una bomba hidráulica

El impulsor de una bomba centrífuga es la encargada de generar toda la carga. El resto de las partes no intervienen de ninguna manera para aumentarla, sino todo lo contrario, genera pérdidas inevitables, tanto hidráulicas como mecánicas. La eficiencia hidráulica se define como la relación de la carga dinámica total disponible en comparación a la carga de entrada.

2.4.1. Pérdida de potencia hidráulica

En cualquier instalación, independientemente del tipo de material de la tubería que se instala siempre se producen pérdidas, por lo que la potencia de la bomba debe ser mayor que la potencia teórica prevista, para poder superar la pérdidas y favorecer al déficit de potencia.

Las pérdidas que se generan entre los puntos de entrada y salida de la bomba, donde se mide la presión de succión y descarga, constituyen las pérdidas hidráulicas. Estas forman parte de pérdidas por fricción a lo largo de la trayectoria del fluido desde la brida de succión hasta la de descarga; pérdidas debidas a cambios que alteran la fluidez del líquido, como la dirección de flujo. Además de las pérdidas de carga existen pérdidas de capacidad, debido a las fugas que existen en los espacios entre las partes rotatorias y estacionarias de las bombas.

2.4.1.1. Pérdida de potencia volumétrica

Estas son pérdidas de caudal que se generan a la salida del rodete de una bomba, en donde hay más presión que en la entrada. Luego parte del fluido, que debe fluir hacia la caja espiral, retrocede por el conducto que forma el juego del rodete con la carcasa, a la entrada de este, para volver a ser impulsado por la bomba. Puede decirse que un líquido con dificultad encuentra fluidez en el régimen laminar a lo largo de una tubería para que se considere pérdida de potencia volumétrica.

2.4.1.2. Pérdida de potencia mecánica

Las pérdidas mecánicas encierran pérdidas de potencia en chumaceras, cojinetes, estoperos y la fricción en el impulsor. La última pérdida es de tipo hidráulico, pero se agrupa con las pérdidas mecánicas puesto que se produce fuera del flujo a través de la bomba y no ocasiona una pérdida de carga.

2.4.2. Eficiencia volumétrica

El caudal de la descarga de la bomba es menor que en la succión y también es menor que el caudal que pasa por el impulsor. La razón de los dos gastos o caudales se llama eficiencia volumétrica. La eficiencia volumétrica expresa la proporción de energía cedida al líquido con respecto al trabajo aplicado.

2.4.3. Eficiencia mecánica

La eficiencia mecánica es la razón de la potencia realmente absorbida por el impulsor, posteriormente convertida en carga, y la potencia aplicada al eje del motor de la bomba.

2.4.4. Eficiencia interna

Considera todas las pérdidas internas, o sea, las hidráulicas y las volumétricas, e incluye las eficiencias hidráulicas y volumétricas en un sistema absoluto.

2.4.5. Eficiencia total

Esta considera todas las pérdidas y eficiencias en el conjunto motor-bomba.

2.5. Teoría y funcionamiento

Las bombas centrífugas trasladan un volumen específico de líquidos a un nivel de referencia mucho más alto. Son máquinas hidráulicas que transforman energía mecánica en energía hidráulica. La bomba autónomamente no logra llevar a cabo la conversión de energía, para este fenómeno utiliza ciertos elementos adicionales, dentro de los cuales se pueden mencionar:

- Una tubería de aspiración, que se compone prácticamente en una brida de aspiración. Claro está que esta tubería puede ser de varios diámetros, esto depende del diseño estipulado del fabricante para cada bomba.

- El rodete que está formado por un grupo de álabes que se pueden configurar de diversas formas, según la misión a la que vaya a ser destinada la bomba, los cuales giran dentro de una carcasa circular. El rodete es impulsado por un motor, que está acoplado al eje, siendo la parte móvil de la bomba. El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta la entrada del rodete, experimentando un cambio de dirección y aumentando la energía cinética.
- La voluta es una parte fija que está fabricada en forma de caracol alrededor del impulsor. Su función principal es recoger el líquido que impulsa el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y orientar el fluido hacia la brida de impulsión de la bomba.
- Una tubería de impulsión, ubicada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y velocidad creadas en la bomba.

2.6. Sistema de bombeo

Un sistema de bombeo se utiliza para distribuir el agua a una vivienda, edificio o industria. Las bombas transmiten presión al fluido de la cisterna y lo envía hacia las edificaciones en donde se requiere el consumo. Un sistema de bombeo se puede decir que es parte de un sistema de alimentación de fluido de un sitio bajo a uno alto, en el caso de cisternas que son generalmente alimentadas por las tomas domiciliarias, la cisterna es un tanque de almacenamiento para tener reserva de agua para un número de días determinados que dependen de la capacidad volumétrica de la misma.

Las bombas más utilizadas en los sistemas de bombeo convencionales son las centrífugas y las axiales, ya que pueden inducir un caudal mayor a medida que disminuye la resistencia o altura piezométrica que deben vencer.

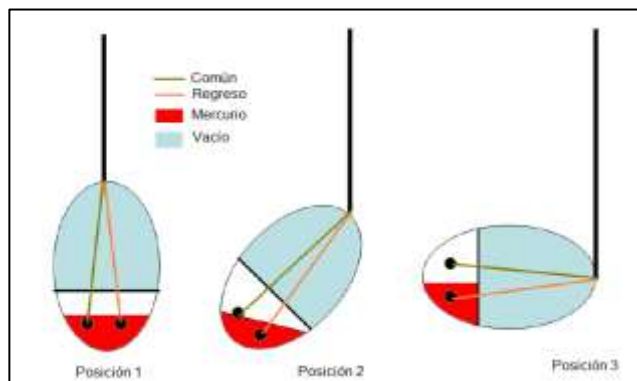
2.6.1. Sistema de bomba hidráulica de tipo centrífuga controlado por electroniveles

Este sistema consta de dos depósitos que pueden ser abiertos o cerrados. El primer depósito se encuentra a una altura relativamente baja o al mismo nivel de referencia de la bomba encargada de transportar un fluido del primer depósito al segundo depósito. El segundo depósito se encuentra a una altura considerablemente alta para permitir la distribución de agua, mediante el peso específico del agua, atraída por la fuerza de gravedad ejercida por la altura de elevación que dicho tanque tendrá respecto al nivel de referencia (primer depósito y bomba hidráulica).

Este sistema es muy utilizado en edificios y residencias por el bajo costo que tiene la instalación y la sencillez que el sistema comprende para su construcción, montaje y mantenimiento. El sistema de control de la bomba hidráulica únicamente viene determinado por dos electroniveles, que miden el nivel de agua en ambos depósitos permitiendo o interrumpiendo así, el flujo de corriente eléctrica que enciende o apaga el motor eléctrico que transmite la potencia hacia el impulsor de la bomba. La función principal de los electroniveles es conmutar la señal eléctrica que se transmite hacia la bomba e indicar el nivel en que se encuentra el agua de los depósitos de almacenamiento, además de facilitar el control de las bombas de manera eficiente.

Estos están compuestos por tres cables (común, normal abierto y normal cerrado). Además internamente están divididos en dos partes: en la parte inferior se encuentran los elementos que actúan como un interruptor, el mecanismo encargado de abrir y cerrar el circuito es el mercurio. Los electroniveles actúan como un interruptor común, solo que lo hacen por medio del nivel de agua, cuando el nivel flota hace que el líquido se derrame abriendo de esta forma el circuito. A continuación se muestran el funcionamiento del nivel con líquidos inmiscibles:

Figura 1. **Funcionamiento de un electronivel**



Fuente: elaboración propia, con base al programa SKETCH DRAWER 2.1.0.

Cuando el electro nivel está en la posición 1

2.6.2. Sistema de bomba centrífuga con sistema hidroneumático

El principal objetivo del sistema hidroneumático es mantener la presión constante en las tuberías del fluido. Este sistema funciona de la siguiente manera: el agua que es suministrada desde la acometida pública, pozos u otra

fuente, es retenida en un tanque de almacenamiento; de donde, a través de un sistema de bombeo, será transportada a un tanque presurizado (de dimensiones y características calculadas en función de la red), y que almacena volúmenes variables de agua y aire.

La bomba trabaja en un rango de presiones que va a depender de las exigencias del sistema. Se llama hidroneumático porque el tanque tiene en su interior una combinación de aire a presión y agua. Cuando hay un consumo de agua el tanque por consiguiente pierde agua y su presión interna cae hasta la presión mínima, en ese preciso instante el presostato que es un interruptor, activa la bomba y este suministra agua que carga al tanque. El sistema aumenta la presión para que esta sea máxima, en ese instante el presostato corta el flujo de energía eléctrica y la bomba se detiene, manteniendo el sistema presurizado por medio del tanque.

2.6.3. Punto de operación

La selección de una bomba está relacionada con la presión a la que se desea trabajar o la que sea requerida por el usuario, estas son algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta para el diseño, presión, altura piezométrica y otras variables son las que hay que incluirlas cuando se desea diseñar un sistema de bombeo. Todas las variables afectan considerablemente el funcionamiento de la bomba y por ende la eficiencia que es la que se busca maximizar.

2.6.3.1. Combinación con el sistema

Si se utiliza una bomba para subir un fluido de un punto A, a otro punto B, la bomba se emplea para vencer la pérdida de carga y superar la diferencia de altura entre los puntos A y B. El punto de funcionamiento vendrá dado por el corte de la curva resistente del sistema con la curva característica de la bomba. El caudal que circula por una bomba sufre un cambio de energía cinética y energía potencial y por tanto, la altura de elevación que proporciona, están condicionados por la interacción bomba-sistema.

2.6.3.2. Consideraciones sobre presión y potencia

La potencia que genera una bomba se puede conocer realizando medidas pertinentes en la presión a la entrada y a la salida, entre la tubería de succión y la tubería de descarga; sin embargo, no es suficiente conocer el cambio de presión, sino hay que tener en cuenta la altura de elevación y la pérdida de carga del sistema, incluyendo también el cambio de energía cinética y las pérdidas entre los puntos de medida.

Se debe conocer con exactitud el número de arranques y paradas del motor para dimensionar su tanque. Si el tanque es pequeño, la demanda de distribución extrae el agua útil del tanque rápidamente y los arranques de las bombas serán demasiado repetitivos. Los ciclos repetitivos de encendido de una bomba generan un consumo excesivo de potencia y energía eléctrica, y por ende un desgaste que disminuye el tiempo de vida del conjunto motor-bomba.

2.7. Tuberías y accesorios en sistemas hidráulicos

Para un óptimo diseño de instalaciones hidráulicas es de suma importancia considerar los tipos de tuberías que pueden utilizarse, así como también los accesorios disponibles, ya que el uso innecesario de estos causa una pérdida que reduce la eficiencia del sistema hidráulico.

A continuación se describen las características y aplicaciones de los diferentes tipos de materiales y accesorios que constituyen los elementos comunes de instalaciones sanitarias:

- Tubería de hierro galvanizado: la aplicación del hierro galvanizado es exclusivamente para tubería que se encuentra expuesta a la intemperie, debido a la alta resistencia a los golpes, proporcionada por su propia estructura interna y por las gruesas paredes de los tubos y conexiones fabricadas con este material. Las tuberías y accesorios de hierro galvanizado están fabricados para trabajar a presiones máximas de 10,5 kg/cm² (cédula 40) y 21,2 kg/cm² (cédula 80). Las aplicaciones generales de la tubería galvanizada cédula 40 se hallan en los siguientes casos:
 - Algunas aplicaciones en el transporte de agua caliente y fría en instalaciones sanitarias que se consideran como económicas, debido a su bajo costo.
 - Puede ser aplicado, aun cuando no es la mejor solución, para el transporte de sedimentos en baños públicos.

- Como se explicó anteriormente, dada su característica de alta resistencia a los esfuerzos internos y mecánicos, se puede utilizar para instalaciones a la intemperie.
- El policloruro de vinilo (P.V.C.) es un material estratificado dentro de los polímeros, clasificado dentro de los termoplásticos, material que para temperaturas altas pueden convertirse en una masa maleable, a la que se puede dar la forma deseada, y para bajas temperaturas el material suele solidificarse. Es empleado en el instalaciones sanitarias de las viviendas y/o edificaciones, magníficas para la conducción de agua potable, agua caliente (C.P.V.C.), drenaje pluvial y drenaje sanitario. Para instalaciones domiciliarias, se utilizan comúnmente tuberías con un diámetro de ½” hasta 4”.

Se denomina como accesorio de tubería a cualquier elemento que integra una línea hidráulica, que no pertenezca a la tubería. Los accesorios son elementos que se utilizan para desviar la dirección del fluido durante su recorrido. Estos elementos son del mismo material que las tuberías y vienen en varias dimensiones. Dentro de los accesorios más utilizados podemos mencionar:

- Bridas
- Codos
- Tees
- Reductor
- Una válvula es un mecanismo que puede ser llamado accesorio, su función es permitir, impedir y controlar el paso un fluido de trabajo, este accesorio puede ser de un material distinto al de la tubería.

2.8. Pérdidas en sistemas de tuberías

La eficiencia de un sistema hidráulico, en cierta forma es inversamente proporcional al número de accesorios y longitud de tubería en el sistema, ya que estos son los mayores causantes de pérdidas en el sistema, además existen diferentes causas que influyen en la pérdida de eficiencia del sistema, factores que delimitan las diferentes pérdidas que ocurren desde la succión de la bomba hasta el punto de descarga, donde variables hidráulicas propias del sistema se reducen considerablemente.

2.8.1. Tipos de flujo

La conducción de un fluido dentro de una tubería en un sistema hidráulico, está representado por un movimiento denominado flujo, el flujo de un fluido puede clasificarse de muchas maneras, tales como turbulento, laminar; real, ideal; reversible, irreversible; permanente, no permanente; uniforme y no uniforme. Siendo los más comunes el flujo laminar y turbulento.

Se llama flujo laminar al movimiento de un fluido cuando las moléculas de este se transportan perfectamente ordenadas, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin mezclarse. Las capas contiguas del fluido se transportan suavemente entre sí. Se dice que este flujo es aerodinámico. Se aplica a velocidades bajas o alta viscosidad en el fluido.

Se llama flujo turbulento cuando el movimiento se hace irregular, desorganizado e impredecible, las partículas se mueven de manera desordenada y las líneas de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos. Se da a velocidades altas o cuando aparecen obstáculos abruptos o cambios bruscos de dirección en el movimiento del fluido.

Para determinar el tipo de flujo de un fluido se utiliza el número adimensional de Reynolds, este engloba diferentes formas para conductos circulares o no circulares, canales abiertos o flujo alrededor de cuerpos sumergidos. El número de Reynolds delimita si un flujo es laminar o turbulento, Para un mismo valor de este número el flujo posee idénticas características cualquiera que sea la tubería o el fluido que circule por ella. Cuando mayor es el diámetro, la densidad y la velocidad, y menor es la viscosidad, más factible es que el flujo sea turbulento.

Para determinar el tipo de régimen en una determinada parte del sistema el número de Reynolds puede ser calculado mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\rho * D * V}{\nu}$$

[Ecuación 1]

Donde:

Re= número de Reynolds [adimensional]

ρ = densidad del agua [kg/m³]

D= diámetro de la tubería [m]

V= velocidad del fluido [m/s]

ν = viscosidad del fluido [N*s/m²]

Para determinar el tipo de régimen por el cual el fluido está pasando se utilizan ciertos parámetros que están en función del número de Reynolds:

- Si $Re < 2\,000 \leftrightarrow$ Flujo laminar
- Si $2\,000 < Re < 3\,000 \leftrightarrow$ Existe una incertidumbre sobre el régimen
- Si $Re > 3\,000 \leftrightarrow$ Flujo turbulento

2.8.2. Pérdidas en accesorios y válvulas

Durante el transporte de fluido se generan pérdidas ya que ningún sistema de tuberías es totalmente eficiente, estas pérdidas están ligadas a fenómenos de turbulencia que se originan con el cambio de dirección y accesorios, tales como codos, juntas, derivaciones, y que se conocen como pérdidas de carga. Las válvulas y accesorios en una línea de tubería descomponen la configuración de flujo, creando un cambio abrupto de régimen de laminar a turbulento o de turbulento a más turbulento, produciendo una pérdida de presión adicional la cual se puede determinar por longitud equivalente.

En términos básicos, el concepto de longitud equivalente consiste en realizar un estudio por separado para cada accesorio en el sistema a experimentar, consiste en realizar una longitud aproximada de tubería recta que, al utilizarse con la ecuación de pérdida por fricción, cree la misma pérdida asociada a la pérdida localizada del accesorio referido.

Finalmente para evaluar la pérdida de carga ocasionada en elementos y accesorios de la instalación tales como válvulas, codos, curvas, difusores, etc. se reemplaza cada elemento que constituye el sistema hidráulico por una longitud de tubería recta equivalente, que ocasiona la misma pérdida de carga que el elemento a analizar. En la tabla I se muestra la longitud equivalente de tubería en metros, para estimar la pérdida de carga en accesorios, según el tipo de accesorio y el diámetro del tubo donde va acoplado el mismo.

Tabla I. **Pérdidas de carga en válvulas y accesorios**

mm / Accesorio	Curva 90°	Codo 90°	Cono difusor	Válvula de pie	Válvula de retención	Válvula de compuerta abierta	Válvula de compuerta 3/4 abierta	Válvula de 1/2 abierta
25	0,2	0,3	5	6	4	0,5	2	15
32	0,3	0,4	5	7	5	0,5	2	15
40	0,4	0,6	5	8	6	0,5	2	15
50	0,5	0,7	5	9	7	0,5	2	15
65	0,7	0,9	5	10	8	0,5	2	15
80	1	1,3	5	12	9	0,5	2	15
100	1,2	1,7	5	15	10	1	4	30
125	1,8	2,5	5	20	15	1	4	30
150	2	2,7	5	25	20	1,5	6	45
200	3	4	5	30	25	2	8	60
250	5	5,5	5	40	30	2	8	60
300	5	7	5	45	35	2	8	60
350	6	8,5	5	55	40	2,5	10	75
400	7	9,5	5	60	50	3	12	90
500	8	11	5	75	60	3,5	14	105
600	14	19	5	90	75	4	16	120
700	16	22	5	100	85	5	20	150

Fuente: < <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn206.html>>.

[Consulta: mayo de 2014].

2.8.3. Pérdidas en tuberías

Al transportar el agua por una tubería, esta produce una velocidad que genera energía cinética, en el contacto con las paredes de la tubería, esta pierde parte de la velocidad debido a la fricción que se produce entre la tubería y el líquido, entre mayor es la velocidad mayor será la fuerza de fricción ejercida. La pérdida de energía de un fluido dentro de una tubería, también se expresa como pérdida de presión o pérdida de carga en la misma.

La ecuación de Darcy-Weisbach es utilizada para establecer las pérdidas ocasionadas por la fricción a lo largo de las tuberías. Determina que la pérdida de energía en una tubería es directamente proporcional a la longitud y la energía cinética presente, e inversamente proporcional al diámetro de la tubería. La fórmula se escribe como:

$$H_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2g}$$

[Ecuación 2]

Dónde:

H_f = pérdida de fricción [m]

f = parámetro adimensional

D = diámetro de la tubería [m]

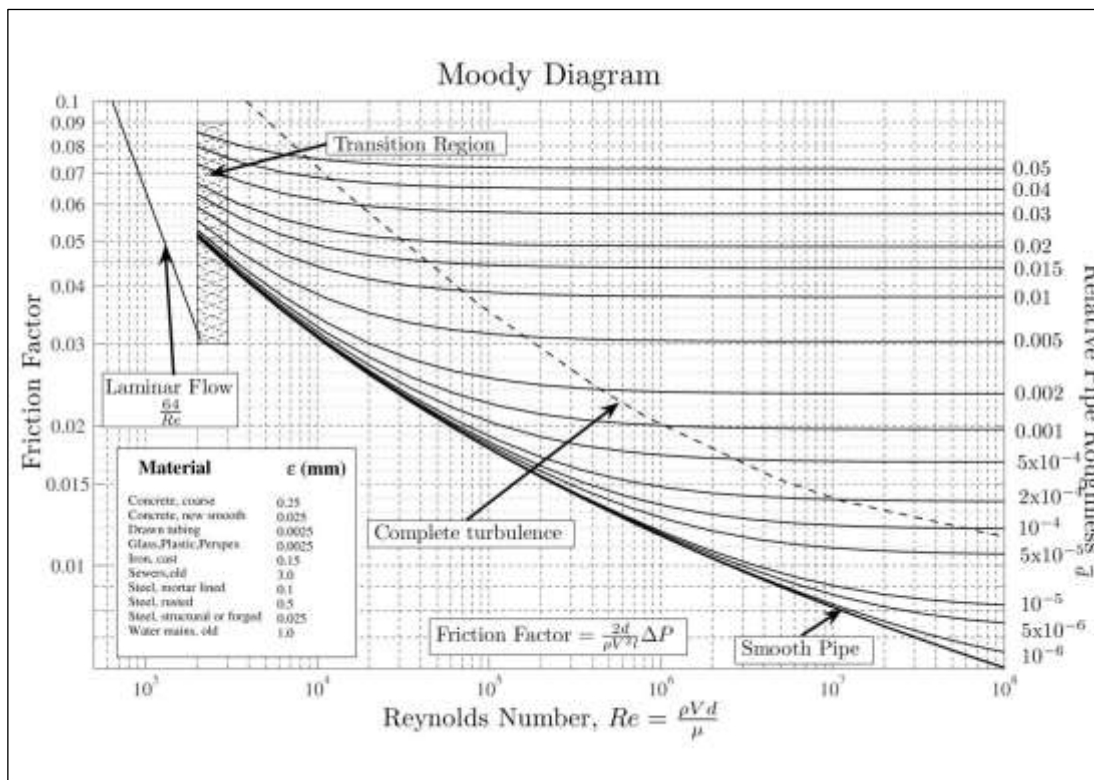
L = longitud del tramo de la tubería [m]

V = velocidad media del fluido [m/s]

g = valor de la aceleración de la gravedad [m/s²]

Especificando un parámetro adimensional f , designando el coeficiente de fricción de Darcy, la viscosidad cinemática del fluido en movimiento y el grado de rugosidad absoluta de pared de la tubería, con el diagrama de Moody, se puede obtener rápidamente la adjudicación del factor de fricción siempre y cuando se conozcan la rugosidad relativa de la tubería y el número de Reynolds para el flujo a determinar.

Figura 2. Diagrama de Moody



Fuente: < <http://metodosnumericosunalmzl.wikispaces.com>>.

[Consulta: mayo de 2014].

2.8.4. Ecuaciones de energía

La ecuación de continuidad expresa la conservación de la masa del fluido a través de las distintas secciones de un tubo cilíndrico, como muestra la figura 3. Aplicando el principio de conservación de la masa, esta no se crea ni se destruye entre las secciones A_1 y A_2 . Por lo tanto, la ecuación de continuidad será:

$$\rho_1 * A_1 * V_1 = \rho_2 * A_2 * V_2 = \rho_1 * Q_1 = \rho_2 * Q_2$$

[Ecuación 3]

Dónde:

ρ = densidad del fluido [kg/m^3]

A = área de la sección transversal [m^2]

V = velocidad [m/s]

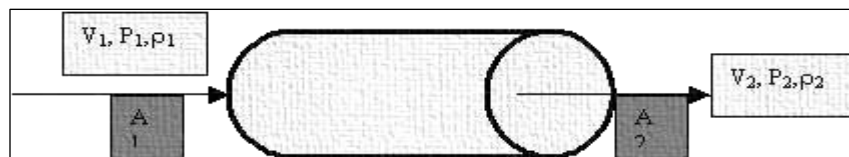
Q = caudal [m^3/s]

Si el fluido es incompresible $\rho_1 = \rho_2$ entonces:

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2 = Q_1 = Q_2$$

[Ecuación 4]

Figura 3. Diagrama de volumen de control



Fuente: <<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujoentuberias/confinado/confinado.html>>

[Consulta: mayo de 2014].

Un fluido en movimiento consigue tener diferentes clases de energía, siendo estas: energía estática E_p , energía cinética E_v , energía potencial E_q y energía interna E_i . Si E_m simboliza la energía mecánica transferida al fluido mediante una bomba, ventilador o turbina, y E_h la energía térmica transferida al fluido, mediante un intercambiador de calor, la aplicación de la ley de conservación de energía entre los puntos 1 y 2 de la figura 4 se define mediante la expresión:

$$(E_p + E_v + E_q + E_i)_1 \pm E_m \pm E_h = (E_p + E_v + E_q + E_i)_2 + \text{Pérdidas}$$

[Ecuación 5]

Las pérdidas en la ecuación 5 constituyen la energía no recuperable, por tratarse de formas de energía irreversibles causadas por rozamiento, energía disipada en forma de calor o ruido. Para un líquido incompresible, la ecuación general anterior puede reescribirse en la forma:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_b = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_L$$

[Ecuación 6]

Dónde:

P_1, P_2 = presión [N/m^2]

V_1, V_2 = velocidad del fluido [m/s]

γ = peso específico [N/m^3]

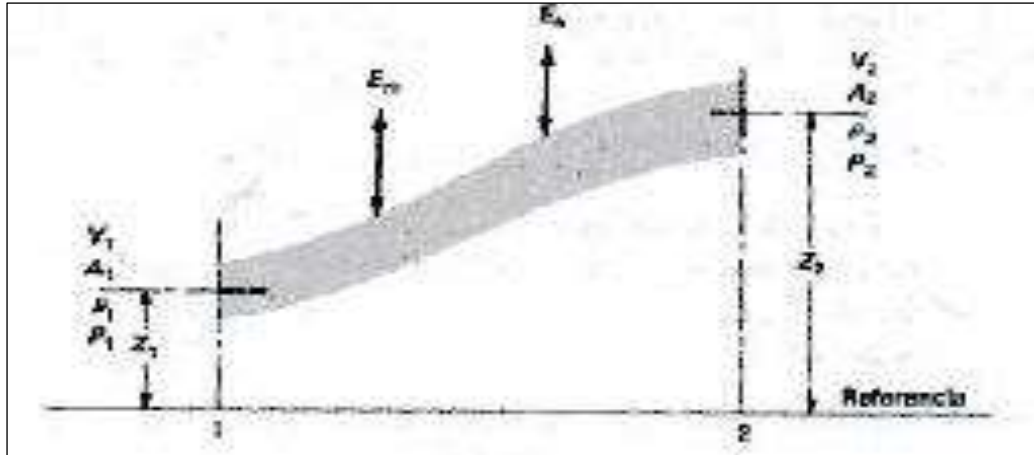
g = aceleración de la gravedad [m/s^2]

Z_1, Z_2 = altura de elevación sobre el plano de referencia [m]

H_b = carga total de la bomba [m]

H_L = pérdida de carga [m]

Figura 4. Diagrama representativo de la ecuación de la energía



Fuente: <<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujointuberias/confinado/confinado.html>>
[Consulta: mayo de 2014].

2.9. Depósitos de almacenamiento

Los depósitos se emplean con los objetivos siguientes:

- Asegurar el suministro de agua frente a averías.
- Mantener la presión (depósitos elevados).
- Simplificar el control y reducir el tamaño de la instalación de bombeo.
- Reducir la presión de las traídas de agua por gravedad y aminorar el intervalo de flujos transitorios.

2.9.1. Depósitos abiertos

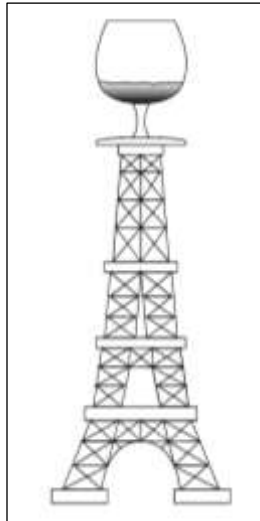
Los depósitos son recipientes para almacenar agua, suelen ser de hormigón armado o pretensado. Pero para depósitos de tamaño regular se utiliza también la chapa de acero, materiales plásticos o compuestos. Si se

quiere realizar la distribución por gravedad deben situarse en una zona topográficamente más alta que los puntos de consumo, cuando esto no es posible hay que construir depósitos elevados. El volumen del depósito se puede calcular exactamente mediante el área por encima de la línea de caudal medio en un análisis horas-consumo del día máximo. También se puede tomar como criterio de cálculo estos dos valores:

- La mitad del consumo del día máximo.
- El 75 % del consumo del día promedio.

El encendido y apagado de las bombas que transportan agua al depósito suele realizarse de forma automática, a través de un sensor de nivel. El volumen entre el nivel mínimo (de arranque) y el máximo (de parada) hay que ajustarlo de forma que, para un período de consumo normal, no se generen arranques repetitivos, manteniendo un intervalo amplio durante la intermitencia.

Figura 5. **Ejemplo de depósito abierto**



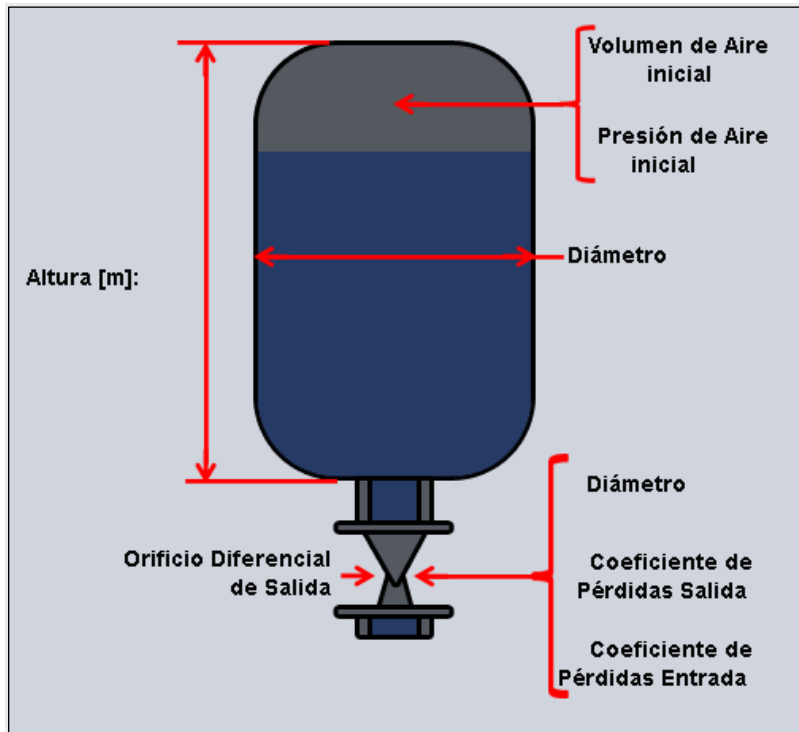
Fuente: RODRÍGUEZ SOZA, Luis Carlos. *Guía para las instalaciones sanitarias en edificios*.
p. 50.

2.9.2. Depósitos a presión

Cuando no es necesario mantener una capacidad de almacenamiento, pero el consumo es muy aleatorio, puede ser conveniente instalar un depósito a presión a la salida de la bomba. Esto disminuye el número de arranques y paradas necesarios en la bomba y se puede hacer que funcione en la zona de rendimientos elevados.

Los depósitos generalmente están contruidos con acero. Conservan aire encerrado en su interior, que actúa como mecanismo almacenador de presión. En algunos casos están abastecidos mediante un compresor que repone el aire que se disipa y mantiene una presión más elevada. Otros modelos tienen una vejiga elástica interior que evita la pérdida de gas y disminuye el mantenimiento. Este tipo de depósitos también se utiliza para amortiguar el golpe de ariete.

Figura 6. Ejemplo de depósito a presión



Fuente: <<http://www.hidrasoftware.com/dispositivos-para-la-atenuacion-del-golpe-de-ariete-en-tuberias-incorporados-en-ariete/>>. [Consulta: mayo de 2014].

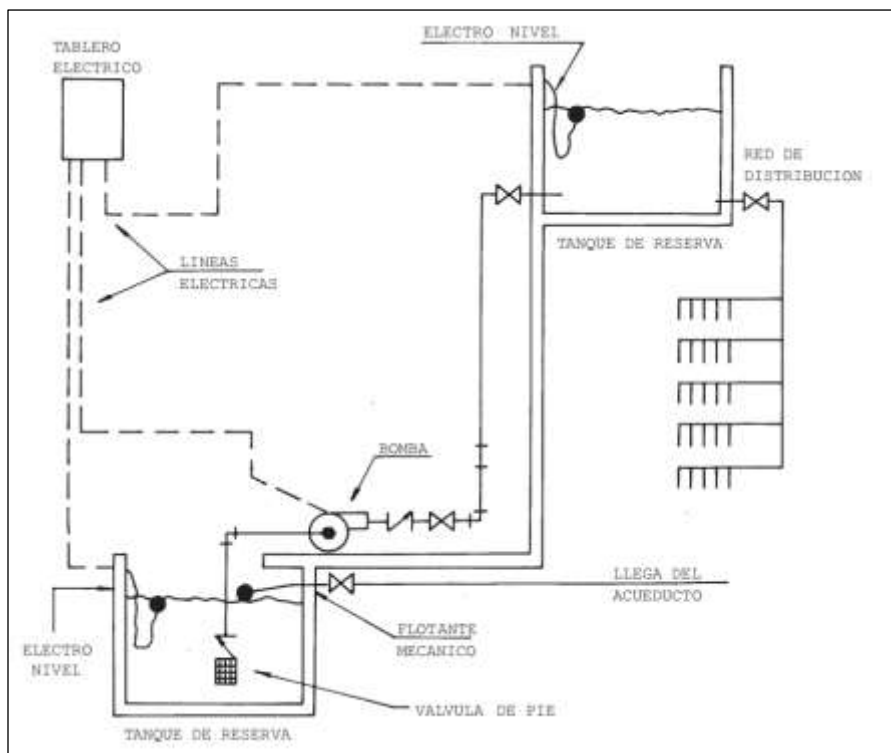
2.10. Diagrama de conexión y equipo de sistemas de bombeo

El procedimiento del montaje e instalación de una estación de bombeo es de suma importancia para el eficiente funcionamiento de la misma, es importante conocer los diferentes elementos que forman parte de la red hidráulica su función, transmisión y control de las diferentes variables que engloban el sistema.

2.10.1. Diagrama eléctrico, conexión y equipo de una bomba hidráulica de tipo centrífuga controlada por electroniveles

Los diagramas de conexión muestran el funcionamiento del equipo y accesorios, así como también la instalación física del sistema de bombeo. La conexión del sistema eléctrico es de suma importancia para el control de la bomba, mediante los electroniveles mencionados en la sección 2.6.1.

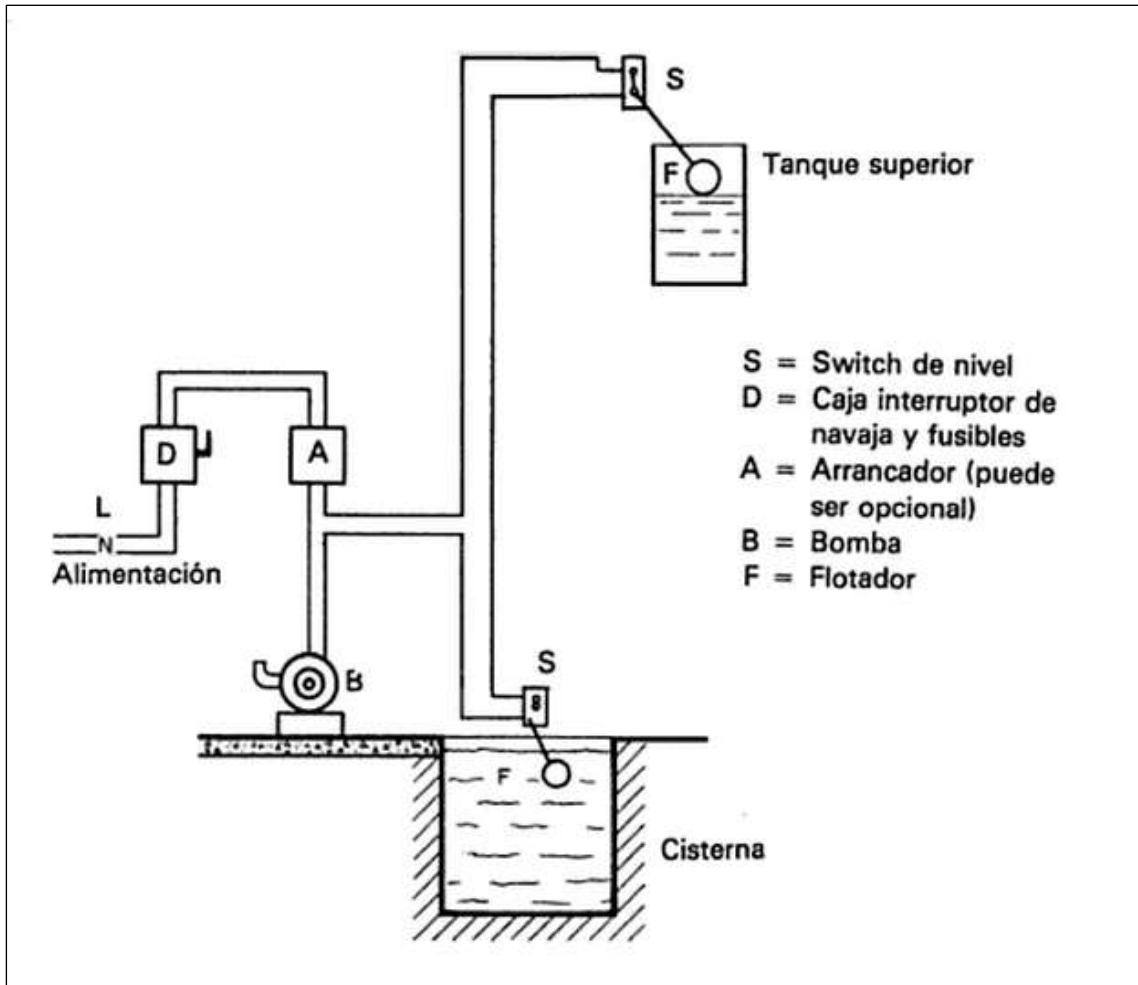
Figura 7. Esquema de funcionamiento de sistema de bombeo controlado por electroniveles



Fuente: <<http://www.fisica.com/sishica/download/Dibujos.pdf>>.

[Consulta: mayo de 2014].

Figura 8. Diagrama eléctrico de sistema de bombeo controlado por electroniveles

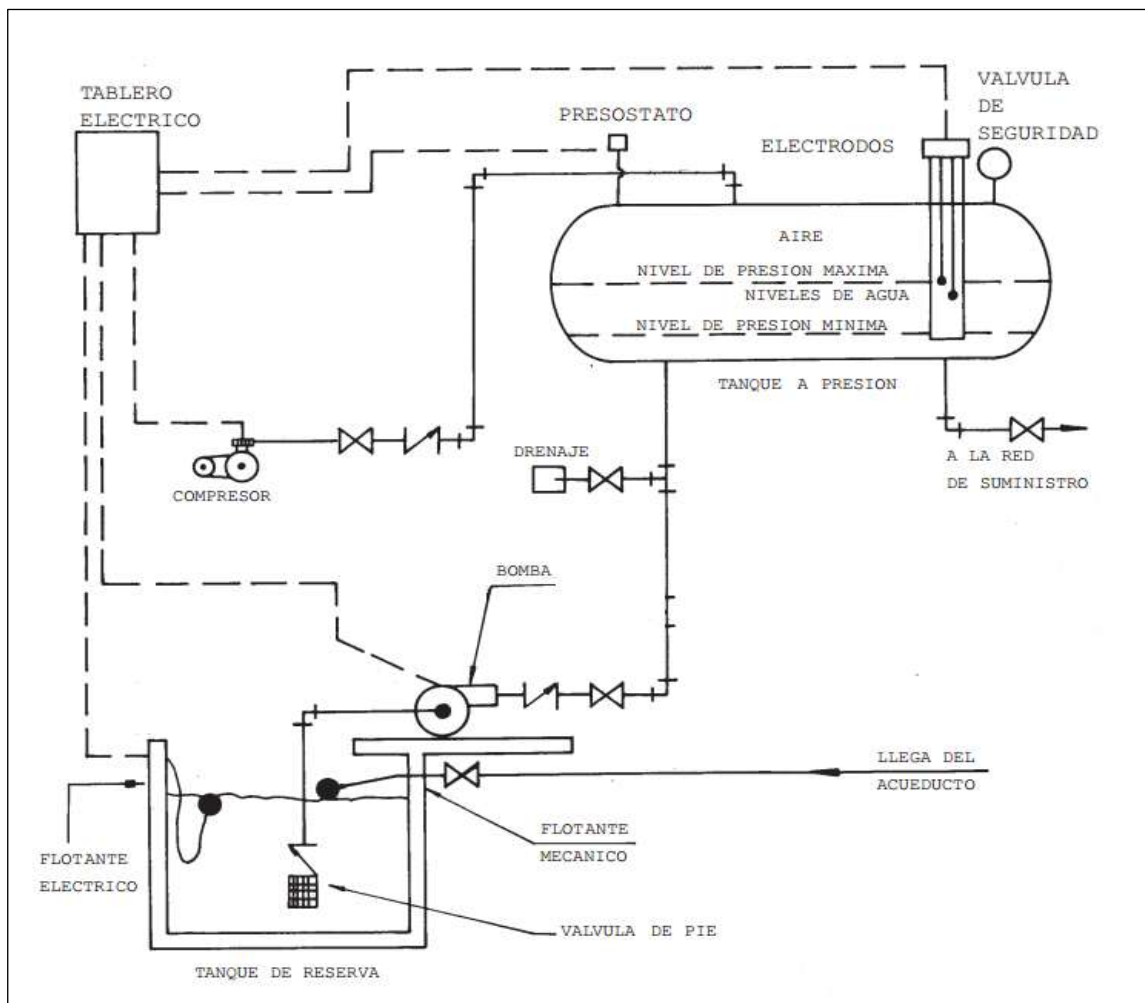


Fuente: ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *El ABC de las instalaciones eléctricas residenciales.*
p. 128.

2.10.2. Diagrama eléctrico, conexión y equipo de una bomba hidráulica de tipo centrífuga con sistema hidroneumático

Para el sistema hidroneumático también es necesario ilustrar los elementos que componen la red de transporte del fluido.

Figura 9. Esquema de funcionamiento de sistema hidroneumático



Fuente: < <http://www.fisica.com/sishica/download/Dibujos.pdf>>. [Consulta: mayo de 2014].

2.11. Variables del sistema eléctrico

El sistema de bombeo se complementa con la instalación del sistema eléctrico, estas variables pueden ser manipuladas de acuerdo a las necesidades del usuario, siempre tomando en cuenta el tipo de servicio eléctrico que la empresa eléctrica está distribuyendo al inmueble. Los principales parámetros eléctricos para el estudio de investigación serán:

- La corriente eléctrica es el movimiento o flujo organizado de electrones que circulan a través de la sección circular del conductor en un determinado tiempo. Su dimensional en el Sistema Internacional de Unidades es el amperio (Amp).
- El voltaje es la fuerza o presión que se ejerce sobre los electrones, para que se desplacen a través de un circuito cerrado. Su dimensional en el Sistema Internacional de Unidades es el voltio (Volt).
- La impedancia es la oposición al movimiento de los electrones, es decir, de la corriente eléctrica. Las bobinas, capacitores y resistencias son impedancias y se denominan elementos activos porque reaccionan al paso de la corriente. Su dimensional en el Sistema Internacional de Unidades varía con respecto al tipo de carga que sea. Para una carga resistiva es el ohm (Ω), para una inductiva es el henrio (He) y para una capacitiva es el faradio (F).
- La potencia eléctrica es la proporción del flujo de energía cedida por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un determinado tiempo. La unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el vatio (W).

2.12. Variables del sistema hidráulico

El estudio e investigación de sistemas de bombeo relacionan la mayor parte de las variables hidráulicas más importantes en el estudio de mecánica de fluidos e hidráulica, a continuación se describen algunas de estas:

- La presión se especifica como una fuerza que actúa sobre una superficie por unidad de área. Para nuestro estudio, el término presión se restringe generalmente a la fuerza ejercida por un fluido por unidad de área de la sección circular que lo transporta. Su dimensional en el Sistema Internacional de Unidades es el pascal (Pa).
- La presión hidrostática es la presión ejercida debido al peso de un fluido en reposo. Es la presión que resisten los sólidos sumergidos en un líquido incompresible. Su dimensional en el Sistema Internacional de Unidades es el pascal (Pa).
- La presión hidrodinámica es la presión termodinámica que depende de la dirección establecida alrededor de un punto que dependerá además del peso del fluido y el estado de su movimiento. Su dimensional en el Sistema Internacional de Unidades es el pascal (Pa).
- Carga hidráulica es un concepto que relaciona la energía existente en un fluido incompresible con la altura de una columna estática equivalente del mismo fluido. Del Principio de Bernoulli, la energía total en un fluido es la energía cinética del fluido, más la energía de presión, más la energía de la altura del fluido con respecto a un punto de referencia. La carga hidráulica se expresa en unidades de longitud (m).

- El flujo volumétrico o caudal es el volumen de fluido que pasa por una superficie dada en un determinado tiempo. Su dimensional en el Sistema Internacional de Unidades está dado en (m^3/s).
- La velocidad es una magnitud física vectorial que expresa el desplazamiento de un cuerpo rígido por unidad de tiempo. En fluidos viene representado por la masa de agua que circula en una sección de tubería en un tiempo determinado. Su dimensional en el Sistema Internacional de Unidades está dado en (m/s).
- El área es un régimen de extensión de una superficie comprendido entre un rango longitudinal específico. En hidráulica se aplica a la sección de tubería usada para el transporte de fluidos. Su Dimensional en el Sistema Internacional de Unidades está dado en (m^2).

2.13. Medidores eléctricos, mecánicos e hidráulicos

Para mejorar el control de las variables comprendidas en un diseño experimental de investigación, para los diferentes sistemas de bombeo anteriormente estudiados, es de suma importancia conocer los dispositivos que miden y registran información pertinente acerca de las variables que definen y proyectan los resultados de la investigación.

2.13.1. Medidores de presión

Los instrumentos mecánicos utilizados para medir presión, pueden clasificarse en:

- Columnas de líquido:
 - Manómetro de tubo en U
 - Manómetro de tubo inclinado
 - Manómetro de presión absoluta
 - Manómetro de pozo
 - Manómetro tipo campana

- Instrumentos elásticos:
 - Diafragmas
 - Fuelles
 - Tubos Bourdon

- Instrumentos electromecánicos y electrónicos:
 - Transductores de presión capacitivos
 - Transductores de presión piezoeléctricos
 - Medidores de esfuerzo (*Strain Gages*)
 - Transductores de presión resistivos
 - Transductores de presión magnéticos

La presión que se define como la fuerza que se ejerce sobre una superficie por unidad de área, es una variable que puede ser controlada, es necesario medir la presión en la entrada de las bombas, se recomienda que no debe estar por debajo de las 20 libras por pulgada cuadrada, ya que las presiones más bajas pueden causar problemas de contracorriente en el sistema de distribución aguas arriba de la bomba.

Tabla II. **Principales características de los medidores de presión**

Tipo de instrumento	Rango óptimo de medida	Exactitud (%)
Tubo en U	20 - 120 cm H ₂ O	0,5-1,0
Manómetro de pozo	10 - 300 cm H ₂ O	0,5-1,0
Tubo inclinado	1 - 120 cm H ₂ O	0,5-1,0
Manómetro campana	0,5 - 100 cm H ₂ O	0,5-1,0
Bourdon simple	0,5 - 600 kg/cm ²	2
Bourdon espiral	0,5 - 2 500 kg/cm ²	1,5
Bourdon helicoidal	0,5 - 5 000 kg/cm ²	1,5
Fuelle	10 cm H ₂ O - 2 kg/cm ²	2
Diafragma	5 cm H ₂ O - 2 kg/cm ²	1,5
Transductor resistivo	0,5 - 350 kg/cm ²	0,5
Transductor capacitivo	0 - 420 kg/cm ²	0,2
Transductor magnético	0 - 700 kg/cm ²	0,2
Transductor piezoeléctrico	0 - 350 kg/cm ²	0,2

Fuente:< <http://todoingenieriaindustrial.wordpress.com/metrologia-y-normalizacion/3-7-medidores-de-presion/>> [Consulta: mayo de 2014].

2.13.2. Medidores de caudal

Son dispositivos que permiten conocer el flujo volumétrico o caudal que está circulando por una tubería, este parámetro es de muchísima importancia en aquellos procesos que comprenden el transporte de un fluido. Entre los más importantes se puede mencionar:

- La placa de orificio es una chapa que se puede sujetar con bridas a la tubería. Al ser de geometría simple, es de fácil instalación y bajo costo, además que no retiene muchas partículas suspendidas en el fluido dentro del orificio.
- La tobera de flujo es un dispositivo de medición que permite evaluar el diferencial de presiones cuando la velocidad del flujo se incrementa repentinamente y las pérdidas empiezan a percibirse. Luego, al instalar un medidor de este tipo se logran mediciones mucho más exactas.
- El tubo Venturi es un dispositivo de medición especialmente utilizado en donde se necesiten crear diferencias de presiones altas. Además, es un medidor mucho más preciso que los mencionados anteriormente. Este medidor permite excelentes mediciones aún si se está trabajando con líquidos con alta viscosidad o con líquidos con material en suspensión pues en el cuello del Venturi es muy difícil que se incrusten sedimentos adheridos, dado que las velocidades son mucho más grandes.

2.13.3. Medidores eléctricos

Para realizar un análisis energético de cualquier máquina que funciona con un flujo de corriente eléctrica, es necesario censar las variables eléctricas que influyen en la máquina que absorbe toda la energía inducida mediante conductores eléctricos, entre los medidores más utilizados se encuentran:

- Voltímetro: mide tensiones eficaces tanto en corriente alterna como en corriente continua, y su colocación es de forma obligatoria en paralelo al componente sobre el cual se quiere medir su tensión.
- Amperímetro: mide el valor medio de la corriente, y su colocación es de forma obligatoria en serie con el componente del cual se quiere saber la corriente que le atraviesa el circuito.
- Óhmetro: mide el valor de la resistencia eléctrica de un dispositivo, de forma obligatoria hay que conectar el medidor en paralelo al componente estando este desenergizado del circuito (sin que le atravesase ninguna intensidad). Mide resistencias en Ohmios (Ω).
- Vatímetro: se emplean para medir la potencia de una máquina eléctrica. Para medir correctamente, se debe conectar de manera simultánea la señal de voltaje y corriente del circuito que se desea medir. Es importante considerar la polaridad del voltímetro y el sentido del flujo de la corriente para una medida con poco rango de incerteza.
- El medidor de energía, conocido también como contador, se emplea para medir el consumo de la energía suministrada a un equipo o acometida eléctrica. Registra la variable en kilovatio-hora (kW-h).

3. DISEÑO METODOLÓGICO

El siguiente diseño metodológico muestra claramente las etapas previas y posteriores a la investigación, así como también la muestra de cálculo y técnicas utilizadas en la recopilación, tabulación y procesamiento de los datos utilizados para la investigación.

3.1. Planteamiento del problema

Disfrutar del agua, el recurso vital de la vida, es un problema que en muchos lugares de Guatemala se agrava paulatinamente. Guatemala es un país que posee abundancia de agua con diversidad de ríos y lago, recurso que debe transportarse hacia todas las acometidas de los miles de usuarios que existen en los diferentes departamentos de la República.

3.1.1. Definición del problema

Existe una gran demanda de este recurso en la vida cotidiana de millones de guatemaltecos; sin embargo, no existe ninguna empresa que preste el servicio de manera constante durante un buen porcentaje de horas durante un día, necesidad que se acrecienta cada día más a los usufructuarios del vital líquido.

3.1.2. Delimitación del problema

Debido al deficiente servicio prestado para el transporte y distribución de agua, un gran porcentaje de usuarios deben recolectar el agua para su uso en tanques de almacenamiento y posteriormente impulsar el vital líquido por medio de bombas que transportan el agua hacia las diferentes tuberías de descarga para los diferentes requerimientos que los recintos demanden.

3.1.3. Justificación

A causa de los diferentes problemas que se mencionan anteriormente, el crecimiento demográfico y el servicio ya obsoleto en algunas regiones de nuestro país, los guatemaltecos han recurrido a invertir en cisternas de agua aéreas y subterráneas para poder almacenar el vital líquido y poder hacer uso de él, las veinticuatro horas del día por medio de sistemas de bombeo. Un análisis energético, así como también de montaje, eficiencia y costos de los sistemas, en beneficio a los usuarios justifica la realización de la presente investigación.

3.2. Variables

Se definió como variable a todo aquello que se va a cuantificar, controlar y procesar durante la investigación. La dimensional de cada variable se trabajó en el Sistema Internacional de Unidades SI, para poder relacionarlas mediante fórmulas y procesos empíricos que delimitan a cada una de ellas.

Tabla III. **Variables**

Variable	Dependiente	Independiente	Respuesta
Potencia	X		
Peso específico	X		
Longitud de tramo	X		
Longitud equivalente	X		
Gravedad	X		
Altura de elevación	X		
Caudal	X		
Pérdida de carga	X		
Velocidad	X		
Área	X		
Diámetro	X		
Carga hidráulica	X		
Número de Reynolds	X		
Eficiencia			X
Kilovatio-hora	X		

Fuente: elaboración propia.

3.3. Recursos humanos

Para la investigación se contó con la colaboración de 2 personas que dieron soporte técnico al equipo en la instalación y montaje de los sistemas de bombeo, además de dos personas más que colaboraron de manera directa con la medición de las diferentes corridas para aforos, toma de datos y extracción de la información de los medidores que se utilizaron. Así como también la colaboración imprescindible del asesor e investigador:

- Investigador: Irwin Giancarlo Herrera Tajtaj
- Asesor: Ing. José Ismael Véliz Padilla

3.4. Presupuesto

En la ejecución práctica se precisó hacer una inversión para la obtención del equipo, accesorios y medidores que se emplearon para llevar a cabo el estudio de campo, y en la siguiente tabla se muestra el costo y características de los elementos utilizados para la investigación.

Tabla IV. **Presupuesto**

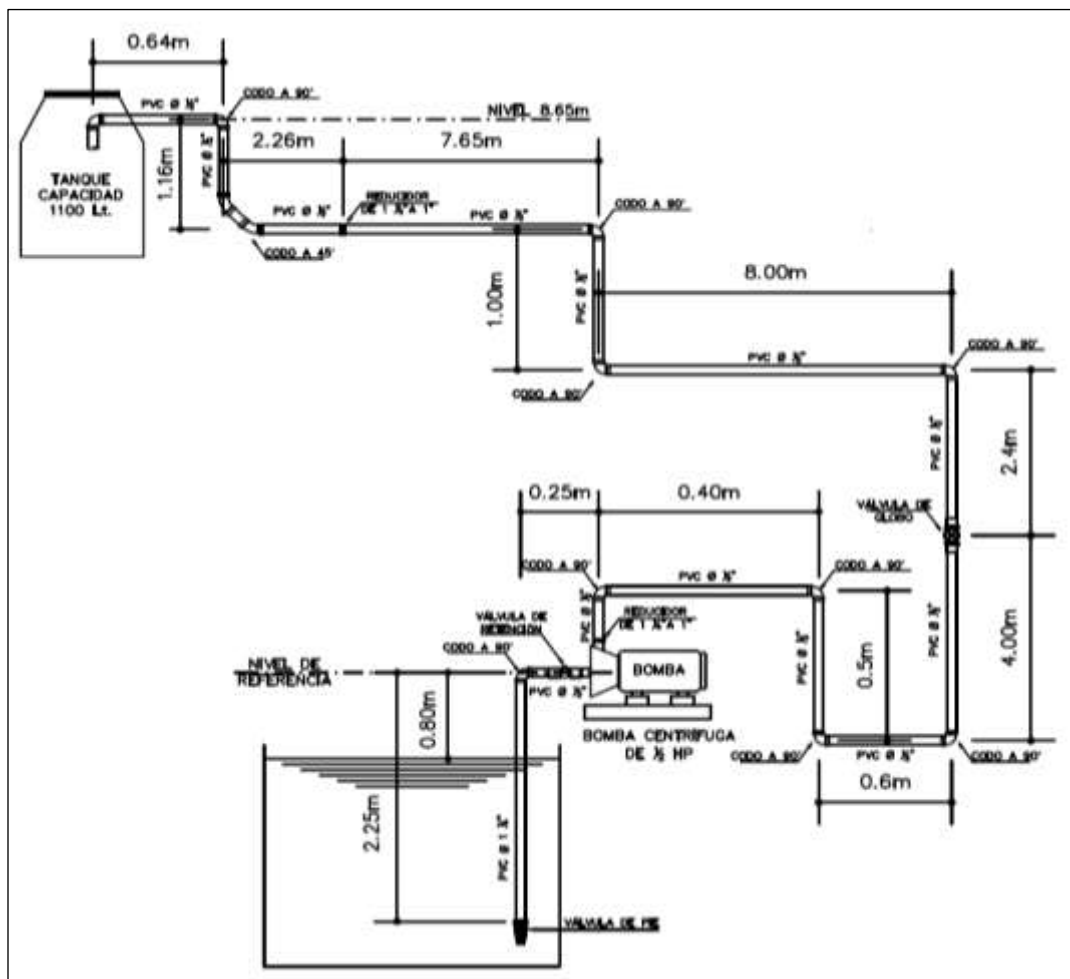
Descripción	Cantidad	Dimensionales y características	Costo	Total
Bomba hidráulica	1	½ HP	Q. 475,00	Q. 475,00
Sistema Hidroneumático	1	½ HP y 24 litros de capacidad del tanque presurizado	Q.1 750,00	Q.1 750,00
Tubería y accesorios de P.V.C.	--	--	Q. 200,00	Q. 200,00
Contador eléctrico	1	Análogo, 120-240 voltios, 3 hilos, monofásico	Q. 365,00	Q. 365,00
Electroniveles (guarda niveles)	2	100-250 voltios	Q. 125,00	Q. 250,00
Manómetro	1	0-120 P.S.I.	Q. 235,00	Q. 235,00
Cronómetro	1	--	Q. 30,00	Q.30,00
Tanque de almacenamiento	1	1 100 litros	Q.1 150,00	Q.1 150,00
Total				Q. 4 455,00

Fuente: elaboración propia.

3.5. Recolección de datos

El estudio de investigación basado en el montaje, arranque, paro, control y operación para cada sistema de bombeo, descrito en los apartados anteriores, se determinó de acuerdo al diseño de equipo, tuberías, accesorios y medidores instalados para llevar a cabo el proceso de recopilación de la información.

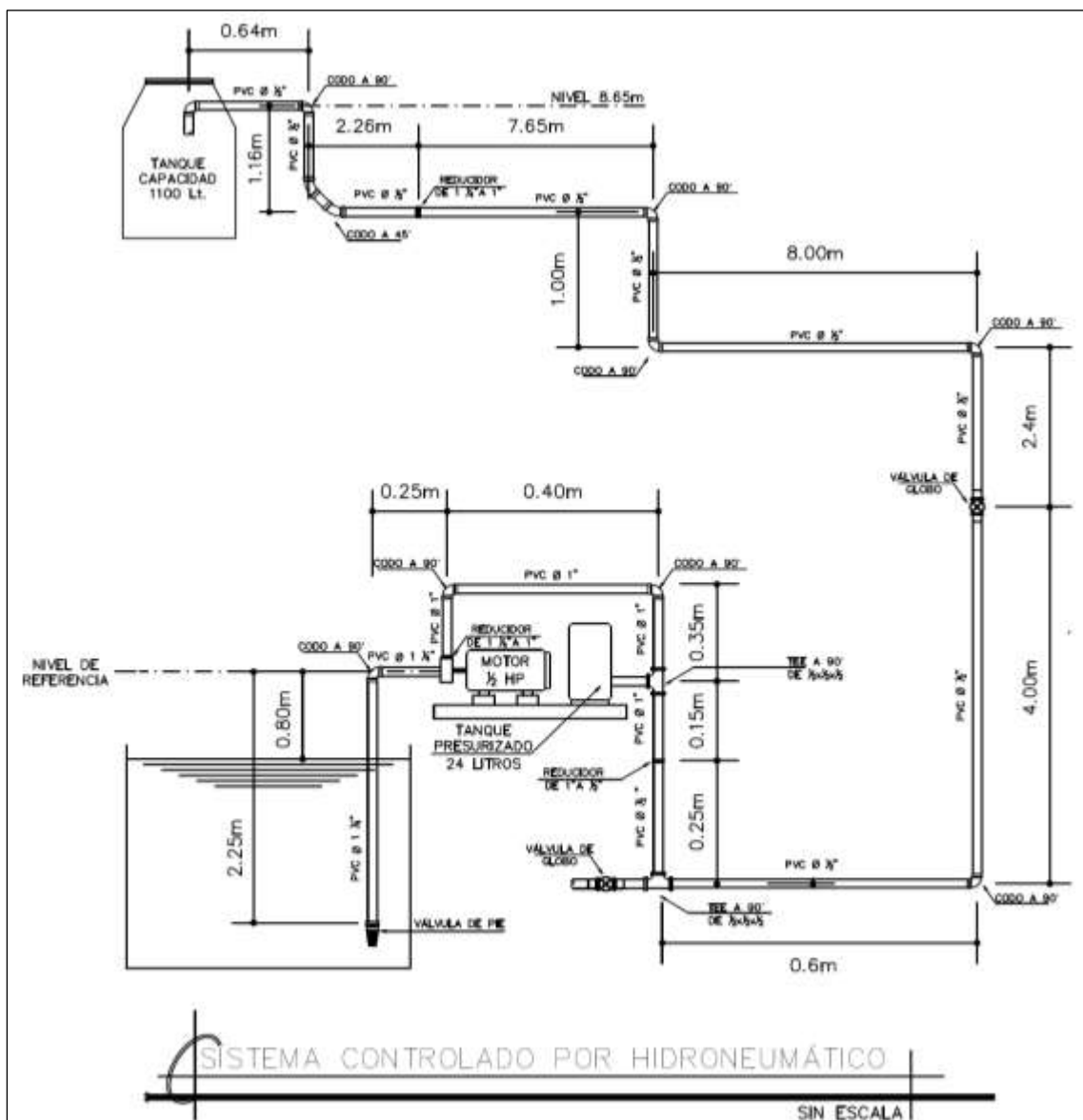
Figura 10. **Diseño del equipo e instalación del sistema de bombeo tanque a tanque**



Fuente: elaboración propia, con base al programa AutoCAD 2007.

En la figura 10 se muestra el diseño del equipo utilizado en el sistema de bombeo controlado por electroneveles, el cual expone a detalle cada elemento utilizado en el montaje e instalación de uno de los sistemas de bombeo a analizar.

Figura 11. **Diseño de equipo e instalación del sistema hidroneumático**



Fuente: elaboración propia, con base al programa AutoCAD 2007.

La figura 11 también muestra el diseño de equipo utilizado para el análisis del sistema hidroneumático, con la modificación oportuna para exponer el cálculo de la eficiencia experimental, bajo la misma condición de servicio a la que se encontró el sistema de bombeo tanque a tanque, cumpliendo así con los objetivos de la investigación.

- Equipo utilizado

El equipo utilizado para los sistemas de bombeo, se eligió premeditadamente, lo cual el estudio conllevó a la utilización de equipo hidráulico de baja potencia, para aplicaciones domiciliarias y comerciales. Las máquinas hidráulicas utilizadas según la placa de datos se describen a continuación mediante las siguientes tablas.

Tabla V. **Placa de datos bomba centrífuga**

Bomba centrífuga			
Qmax: 90 L/min		Hp: 1/2	
Hmax: 23m		Temperatura máxima del fluido: 55°C	
V: 115 volt	Hz: 60	Amp: 4,0 – 9,0	RPM: 3 600

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Placa de datos bomba con sistema hidroneumático**

Bomba ProJet Serie SN			
Qmax: 50 L/min		Hp: 1/2	
Hmax: 32m		Temperatura máxima del fluido: 60°C	
V: 115/230 volt	Hz: 50 - 60	Amp: 4,5 – 9,5	Rpm: 3 450

Fuente: elaboración propia.

Así también se contó con equipo para la medición de variables eléctricas, en este caso dos multímetros de marca Fluke; depósitos regulados para el aforo en la medición de caudales para las bombas; un contador eléctrico que inspeccionó el consumo energético de los motores que transmiten la potencia a los impulsores de las bombas empleadas y por último un cronómetro que registró los tiempos para aforos y uso aproximado de las máquinas hidráulicas.

3.6. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para reunir la información necesaria previo al procesamiento de la información, en cumplimiento con los objetivos de la investigación, se procedió a registrar cada variable censada por los medidores para posteriormente calcularla. Para su análisis fue necesario conocer los caudales que circulaba en cada sistema de tubería, las longitudes de tubería, la altura de elevación del tanque de almacenamiento, así como también los diámetros y áreas de las tuberías y accesorios que se utilizaron, y estos se exponen en la figura 10 y 11 respectivamente.

- Determinación del área de la sección de tuberías

$$A = \pi(r)^2$$

[Ecuación 7]

Donde:

A = área de la sección circular de tubería [m^2]

r = radio de la sección circular de tubería [m]

La determinación de la sección de las diferentes tuberías utilizadas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Áreas de las tuberías utilizadas en los sistemas de bombeo**

Diámetro de tubería [plg]	Radio de la tubería [m]	Ecuación 7	Área [m²]
½	0,00635	$A = \pi(0,00635)^2$	0,000126676
1	0,0127	$A = \pi(0,0127)^2$	0,000506770
1¼	0,015875	$A = \pi(0,015875)^2$	0,000791730

Fuente: elaboración propia, basada en ecuación 7.

- Cálculo del tiempo promedio para los aforos volumétricos

Para el aforo volumétrico se utilizó un recipiente de 20 litros, sobre el cual se hicieron cinco mediciones de tiempo de llenado del mismo. La tabla VIII muestra los tiempos obtenidos para cada bomba utilizada en la investigación.

Tabla VIII. **Tiempos de llenado para el aforo volumétrico**

Corrida	Tiempo de bomba centrífuga [s]	Tiempo de bomba sistema hidroneumático [s]
1	44,05	47,65
2	44,23	47,63
3	44,12	47,52
4	44,18	47,56
5	44,17	47,54
Promedio	44,15	47,58

Fuente: elaboración propia.

- Determinación de caudal para cada bomba utilizada

El cálculo del caudal para cada bomba empleada en los sistemas de bombeo utilizados en la investigación también viene delimitado mediante la fórmula:

$$Q = \frac{Vol}{t}$$

[Ecuación 8]

Donde:

Q= caudal [m³/s]

Vol= volumen [m³]

t= tiempo [s]

Se utilizó un recipiente cilíndrico con capacidad de 20 litros que equivalen a 0,02 m³, se calculó el caudal mediante la ecuación 8, mostrando la tabla IX los resultados obtenidos.

Tabla IX. **Caudal en bombas hidráulicas**

Bomba	Volumen [m³]	Tiempo [s]	Ecuación 8	Caudal [m³/s]
Centrífuga	0,02	47,58	$Q = \frac{0,02}{47,58}$	0,00045300113
Hidroneumático	0,02	49,41	$Q = \frac{0,02}{49,41}$	0,00040477636

Fuente: elaboración propia, basada en ecuación 8.

Donde el caudal se mantiene constante en todas las tuberías para cada sistema de bombeo; es decir, el caudal no varía en todos los segmentos de tubería, desde la tubería de succión hasta el último tramo de tubería de descarga.

- Determinación de la velocidad media del fluido para cada bomba

El cálculo de la velocidad media del fluido en movimiento se determinó mediante la fórmula:

$$V = \frac{Q}{A}$$

[Ecuación 9]

Donde:

V= velocidad media del fluido [m/s]

Q= caudal [m³/s]

A= área de la sección circular de tubería [m²]

En la tabla X se muestra el resultado de la velocidad obtenido para cada diámetro de tubería existente, siendo el área de la sección circular una variable dependiente de la velocidad.

Tabla X. **Velocidad en tuberías del sistema hidráulico**

Bomba	Diámetro [m]	Caudal [m ³ /s]	Área [m ²]	Ecuación 9	Velocidad [m/s]
Centrífuga	0,0127	4,53E-04	1,27E-04	$V = \frac{4,53E - 04}{1,27E - 04}$	3,566
	0,03175	4,53E-04	7,92E-04	$V = \frac{4,53E - 04}{7,92E - 04}$	0,571

Continuación de la tabla X.

Hidroneumático	0,0127	4,05E-04	1,27E-04	$V = \frac{4,05E - 04}{1,27E - 04}$	3,187
	0,0254	4,05E-04	5,07E-04	$V = \frac{4,05E - 04}{5,07E - 04}$	0,798
	0,03175	4,05E-04	7,92E-04	$V = \frac{4,05E - 04}{7,92E - 04}$	0,511

Fuente: elaboración propia, basada en ecuación 9.

- Determinación del Número de Reynolds para los diferentes diámetros y velocidades características en tuberías

El número de Reynolds como se mencionó en la sección 2.8.1. Permite conocer el tipo de flujo que se transporta a través de las tuberías; además es fundamental para conocer el coeficiente de fricción, mediante el diagrama de Moody, ya que dicho coeficiente es una variable dependiente para cálculo de pérdidas por fricción o rozamiento.

En la tabla XI se resume el cálculo para la determinación del Número de Reynolds, para posteriormente ser aplicado al diagrama de Moody; donde los valores para la viscosidad del fluido $\nu = 1,307E - 03 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ y densidad del agua $\rho = 999 \text{ kg}/\text{m}^3$, son constantes a una temperatura del fluido de 10°C. Los datos fueron extraídos del anexo 1.

Tabla XI. **Número de Reynolds para tuberías del sistema hidráulico**

Bomba	Diámetro [m]	Velocidad [m/s]	Ecuación 1	Número de Reynolds
Centrífuga	0,0127	3,566	$Re = \frac{999 * 0,0127 * 3,566}{1,307E - 03}$	34 624,87
	0,03175	0,571	$Re = \frac{999 * 0,03175 * 0,571}{1,307E - 03}$	13 880,55
Hidroneumático	0,0127	3,187	$Re = \frac{999 * 0,0127 * 3,187}{1,307E - 03}$	30 938,91
	0,0254	0,798	$Re = \frac{999 * 0,0254 * 0,798}{1,307E - 03}$	15 499,97
	0,03175	0,511	$Re = \frac{999 * 0,03175 * 0,511}{1,307E - 03}$	12 402,91

Fuente: elaboración propia, basada en ecuación 1.

- Determinación del factor de fricción y coeficiente de rugosidad en tuberías

El factor de fricción es dependiente del Número de Reynolds anteriormente determinado y también del coeficiente de rugosidad, es por ello que es imprescindible conocer el valor de la rugosidad relativa para posteriormente establecer un valor del coeficiente de fricción o rozamiento, obtenido directamente del diagrama de Moody (figura 2). El valor de rugosidad relativa viene expresado mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D}$$

[Ecuación 10]

Donde:

ε_r = rugosidad relativa [adimensional]

ε = rugosidad absoluta [mm]

D= diámetro de tubería [mm]

Conociendo el valor de la rugosidad relativa para cada tramo de tubería y así mismo el Número de Reynolds, se estableció un valor aproximado del valor del coeficiente de fricción o parámetro adimensional f , mediante el diagrama de Moody (figura 2). La tabla XII muestra los cálculos de la rugosidad relativa (adimensional), usa un valor de coeficiente de rugosidad absoluta $\varepsilon=0,00015$ mm (anexo 2) y asume el valor del coeficiente de fricción f (adimensional) para los diferentes tramos de los sistemas de tubería.

Tabla XII. **Rugosidad relativa y factores de fricción de tubería**

Bomba	Diámetro [mm]	Rugosidad Absoluta [mm]	Ecuación 10	Rugosidad Relativa	Factor de fricción
Centrífuga	12,7	0,0015	$\varepsilon_r = \frac{0,0015}{12,7}$	1,18E-04	0,02319
	31,75	0,0015	$\varepsilon_r = \frac{0,0015}{31,75}$	4,72E-05	0,02914
Hidroneumático	12,7	0,0015	$\varepsilon_r = \frac{0,0015}{12,7}$	1,18E-04	0,02783

Continuación de la tabla XII.

Hidro-neumático	25,4	0,0015	$\varepsilon_r = \frac{0,0015}{25,4}$	5,91E-04	0,02835
	31,75	0,0015	$\varepsilon_r = \frac{0,0015}{31,75}$	4,72E-05	0,02998

Fuente: elaboración propia basada en ecuación 10.

- Determinación de la longitud equivalente de pérdidas por fricción en accesorios

Se determinó la equivalencia que producen los accesorios en metros lineales que componen el circuito hidráulico de los sistema de bombeo (figura 10 y 11), la tabla XIII muestra la cantidad de accesorios utilizados por cada sistema de bombeo analizado; los datos de longitud equivalente fueron extraídos del anexo 3.

Tabla XIII. Longitud equivalente de accesorios del sistema hidráulico

Tipo de control	Diámetro del accesorio [m]	Tipo de accesorio	Longitud equivalente [m]	Cantidad de accesorios	Longitud equivalente subtotal [m]	Longitud equivalente total [m]	
Electroniveles	0,0127	Válvula de globo	5,18	1	5,18	8,3	
		Codo de 45°	0,24	1	0,24		
		Codo de 90°	0,30	8	2,4		
		Contracción brusca	0,18	1	0,18		
		Copla	0,30	1	0,3		
	0,03175	Válvula de retención	3,66	1	3,66	4,36	
		Codo de 90°	0,70	1	0,7		
	Hidroneumático	0,0127	Válvula de globo	5,18	1	5,18	7,52
			Codo de 45°	0,24	1	0,24	
			Codo de 90°	0,30	5	1,5	
Copla			0,30	1	0,3		
Te			0,30	1	0,3		
0,0254		Contracción brusca	0,30	2	0,6	2,16	
		Codo de 90°	0,52	2	1,04		
		Te	0,52	1	0,52		
0,03175		Válvula de retención	3,66	1	3,66	4,36	
		Codo de 90°	0,70	1	0,7		

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior convierte en metros lineales de tubería, cada uno de los accesorios utilizados en el sistema hidráulico por sistema de bombeo. También se describe a continuación mediante la tabla XIV la longitud de tubería lineal y la adición de la longitud equivalente por accesorios, para los diferentes diámetros de tubería utilizados en el diseño e instalación de equipo expuesto en las figuras 10 y 11 respectivamente.

Tabla XIV. **Longitud total de tubería y accesorios**

Tipo de control	Diámetro de tubería/ accesorio [m]	Longitud lineal de tubería [m]	Longitud equivalente de accesorios [m]	Longitud total [m]
Electroniveles	0,0127	28,81	8,3	37,11
	0,03175	2,50	4,36	6,86
Hidroneumático	0,0127	27,71	7,52	35,23
	0,0254	1,10	2,16	3,26
	0,03175	2,50	4,36	6,86

Fuente: elaboración propia.

- Determinación de las pérdidas a lo largo de tuberías y accesorios

Las pérdidas a lo largo de todo el conducto del sistema hidráulico son de suma importancia, ya que estas se oponen al libre movimiento de las partículas que componen el vital líquido. Es trascendental conocer esta energía, ya que esta se suma a la energía que debe vencer la bomba para el diseño de su potencia y/o medición de su eficiencia como máquina motriz. Para la investigación se utilizó la ya mencionada ecuación de Darcy Darcy-Weisbach en la sección 2.8.3. A continuación en la tabla XV se muestra de los cálculos y resultados de las pérdidas por fricción y localizadas en conjunto, mediante la ecuación 2.

Tabla XV. **Pérdidas totales en tuberías y accesorios**

Tipo de control	Factor de fricción	Longitud de tubería [m]	Diámetro de tubería [m]	Velocidad del fluido [m/s]	Valor de la gravedad [m/s ²]	Ecuación 2	Pérdida Total [m]	Pérdida por sistema [m]
Electroniveles	0,0231	37,11	0,0127	3,566	9,81	$H_f = \frac{0,0231 * 37,11 * 3,566^2}{0,0127 * 2(9,81)}$	43,95	44,06
	0,02914	6,86	0,03175	0,571	9,81	$H_f = \frac{0,0291 * 6,86 * 0,571^2}{0,03175 * 2(9,81)}$	0,11	

Continuación de la tabla XV.

Hidroneumático	0,0278	35,23	0,0127	3,187	9,81	$H_f = \frac{0,0278 * 35,23 * 3,187^2}{0,0127 * 2(9,81)}$	39,98	40,18
	0,0283	3,26	0,0254	0,798	9,81	$H_f = \frac{0,0283 * 3,26 * 0,798^2}{0,0254 * 2(9,81)}$	0,12	
	0,0299	6,86	0,03175	0,511	9,81	$H_f = \frac{0,0299 * 6,86 * 0,511^2}{0,03175 * 2(9,81)}$	0,09	

Fuente: elaboración propia basada en ecuación 2.

- Determinación de la potencia hidráulica y eficiencia de bomba centrífuga controlada por electroniveles

Para determinar la carga de la bomba se utilizó la ecuación 6, anteriormente estudiada en la sección 2.8.4.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_b = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_L$$

La figura 10, permite considerar el diagrama de equipo para el análisis de la ecuación de energía, donde el nivel de referencia se encuentra justamente en la base de la bomba hidráulica, simplificándose la ecuación en la siguiente expresión:

$$Z_1 + H_b = +Z_2 + H_L$$

Debido a que no existe presión en ninguno de los dos tanques de almacenamiento, la presión es atmosférica y su valor es despreciable; no existe ningún tipo de velocidad en la columna de agua de los tanques y no existe transferencia de calor en las paredes de la tubería. Despejando la variable H_b , la ecuación queda despejada de la siguiente manera:

$$H_b = Z_2 + H_L - Z_1$$

Usando los valores para el sistema de bombeo controlado por electroneveles, donde $Z_2=8,56$ m. (Altura de la columna de agua del tanque de elevación al nivel de referencia), $H_L=44,06$ m. (Pérdidas totales en tuberías y accesorios, tabla XV) y $Z_1=-0,8$ m. (Altura de la referencia a la columna de agua del tanque de almacenamiento), la carga total en metros, a vencer por medio de la bomba es:

$$H_b = 8,56m + 44,06m - (-0,8m)$$

$$H_b = 53,42 m.$$

Se determinó la potencia hidráulica de la bomba mediante la siguiente ecuación:

$$P_H = Q * \gamma * H_b$$

[Ecuación 11]

Donde:

P_H = potencia hidráulica [W]

Q = caudal [m^3/s]

γ = peso específico del agua [N/m^3]

H_b = carga de la bomba [m]

La potencia de la bomba centrífuga controlada por electroniveles se calculó en base a los siguientes valores: $Q=0,000453 \text{ m}^3/\text{s}$ (tabla IX), $\gamma= 9 804 \text{ N/m}^3$ (anexo 1) y $H_b= 53,42 \text{ m}$. (Anteriormente calculado).

$$P_H = 0,000453 \text{ m}^3/\text{s} * 9 804 \text{ N/m}^3 * 53,42 \text{ m}$$

$$P_H = 237,25 \text{ W}$$

La eficiencia de la bomba se determinó mediante la ecuación:

$$\eta = \frac{P_H}{P_E} * 100$$

[Ecuación 12]

Donde:

η = eficiencia [%]

P_H = potencia hidráulica [W]

P_E = potencia de la máquina motriz [W]

Para así finalizar el cálculo de la eficiencia de la bomba centrífuga controlada por electroniveles con los siguientes valores: $P_H=237,25 \text{ W}$. (Potencia calculada para la bomba centrífuga) y $P_E=373 \text{ W}$. (Equivalencia con $\frac{1}{2}$ HP, tomado de la placa de datos de la bomba).

$$\eta = \frac{237,25 \text{ W}}{373 \text{ W}} * 100 = 63,60 \%$$

- Determinación de la potencia hidráulica y eficiencia de bomba con sistema hidroneumático

Para determinar la carga de la bomba también se utilizó la ecuación 6.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_b = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_L$$

En la figura 11 cabe aclarar que el sistema de tuberías de descarga del sistema hidroneumático fue acoplado al mismo que fue construido para el análisis del sistema controlado con electroniveles, con el objetivo que se comparara su potencia y eficiencia bajo las mismas condiciones de trabajo. Esta también permite considerar el diagrama de equipo para el análisis de la ecuación de energía, donde al igual que el caso anterior nivel de referencia se encuentra justamente en la base de la bomba hidráulica, simplificándose la ecuación en la siguiente expresión:

$$Z_1 + H_b = +Z_2 + H_L$$

Debido a que no existe presión en ninguno de los dos tanques de almacenamiento, la presión es atmosférica y su valor es despreciable; no existe ningún tipo de velocidad en la columna de agua de los tanques y no existe transferencia de calor en las paredes de la tubería. Despejando la variable H_b , la ecuación queda despejada de la siguiente manera:

$$H_b = Z_2 + H_L - Z_1$$

Usando los valores para el sistema de bombeo con sistema hidroneumático, donde $Z_2=8,56$ m. (Altura de la columna de agua del tanque de

elevación al nivel de referencia), $H_L=40,18$ m. (Pérdidas totales en tuberías y accesorios, tabla XV) y $Z_1=-0,8$ m. (Altura de la referencia a la columna de agua del tanque de almacenamiento), la carga total en metros, a vencer por medio de la bomba es:

$$H_b = 8,56m + 40,18m - (-0,8m)$$

$$H_b = 49,54m.$$

Se determinó la potencia hidráulica de la bomba mediante la siguiente ecuación 11, donde la potencia de la bomba con sistema hidroneumático se calculó en base a los siguientes valores: $Q=0,00040477636$ m³/s (tabla IX), $\gamma=9\,804$ N/m³ (anexo 1) y $H_b=49,54$ m. (Anteriormente calculado).

$$P_H = 0,00040477636m^3/s * 9\,804N/m^3 * 49,54m$$

$$P_H = 196,59W$$

La eficiencia de la bomba con sistema hidroneumático se determinó mediante la ecuación 12, con los siguientes valores: $P_H=196,59$ W. (Potencia calculada para la bomba con sistema hidroneumático) y $P_E=373W$. (Equivalencia con ½ HP, tomado de la placa de datos de la bomba).

$$\eta = \frac{196,59W}{373W} * 100 = 52,70\%$$

- Determinación de la eficiencia teórica de las bombas utilizadas en la investigación

La determinación de la eficiencia que el fabricante diseña, puede calcularse mediante la fórmula:

$$\eta = \frac{g * H_{max} * Q_{max}}{P_T} * 100$$

[Ecuación 13]

Donde:

η = eficiencia [%].

g = aceleración de la gravedad [m/s^2]

H_{max} = carga máxima de la bomba [m]

Q_{max} = caudal máximo de diseño [m^3/s]

P_T = potencia teórica [Kw]

Se procedió a calcular la eficiencia de la bomba centrífuga, mediante los valores de $H_{max} = 23$ m., $P_T = 1/2HP = 0,373$ Kw y $Q_{max} = 90L/min = 0,0015$ m^3/s . (Valores obtenidos de la tabla V).

$$\eta = \frac{9,81 * 23 * 0,0015}{0,373} * 100 = 90,73 \%$$

Así mismo también se calculó la eficiencia de la bomba con sistema hidroneumático, basado en los valores de $H_{max} = 32$ m., $P_T = 1/2HP = 0,373$ Kw y $Q_{max} = 50L/min = 0,0008333$ m^3/s . (Valores obtenidos de la tabla VI).

$$\eta = \frac{9,81 * 32 * 0,0008333}{0,373} * 100 = 70,13 \%$$

- Determinación del costo de operación de los sistemas de bombeo

Con el equipo montado y funcionando a plena carga, el siguiente factor importante a tomar en consideración para el análisis energético, es el costo de operación, ya que la utilización del servicio requiere de energía eléctrica para impulsar el eje del motor que transmite potencia al impulsor de la bomba;

servicio el cual es cobrado por la empresa que presta el servicio de energía al recinto donde se instalará el sistema de bombeo. El cobro del servicio es totalmente dependiente de las horas de utilización de la carga eléctrica (motor eléctrico) y de la potencia eléctrica que este desarrolle durante su operación. El consumo de energía eléctrica viene expresado mediante la siguiente ecuación:

$$C = P_{em} * h_o$$

[Ecuación 14]

Donde:

C = consumo energético [Kw-h]

P_{em} = potencia eléctrica media [Kw]

h_o = horas de operación [h]

Los sistemas de bombeo además de ser instalados para las mediciones de las eficiencias, también fueron instalados con el propósito de medir el costo operacional para cada tipo de control. Para ello, a cada acometida eléctrica le fue acoplado un contador eléctrico monofásico 120 voltios, el cual registró el consumo en kW-h para cada bomba.

Para cada bomba se tuvo un rango de 30 días midiendo el consumo, funcionando las bombas durante este período de tiempo, atendiendo los servicios básicos de agua potable, para una cantidad de 5 personas, 3 retretes, 4 lavamanos, 1 lavadora de ropa, y una pila para agua con capacidad de 2.5 toneles, aplicado totalmente a la realidad en cuanto al consumo de agua. Durante los treinta días para cada bomba el contador registró las siguientes cifras:

Tabla XVI. **Consumo eléctrico de bombas por mes**

	Consumo [kw-h]
Bomba centrífuga control mediante electroniveles	42,30
Bomba con sistema hidroneumático	53,50

Fuente: elaboración propia.

Siendo el costo total de operación anual:

$$C_c = C * T_Q * 12$$

[Ecuación 15]

Donde:

C_c = costo por consumo [Quetzales]

C = consumo [kW-h]

T_Q = tarifa aplicada en la empresa [Quetzales/kW-h]

12= meses por año

Para la bomba controlada por electroniveles el consumo anual será calculado bajo los siguientes parámetros: $C = 42,30$ [kW-h] y $T_Q = 2,135753$ [Quetzales/kW-h] (Energuate, Junio de 2014), siendo el consumo:

$$C_c = 42,30 * 2,27609984 * 12 = 1\ 155,3482$$

Y el consumo anual para la bomba con sistema hidroneumático será calculado bajo las siguientes medidas: $C = 53,50$ [kW-h] y $T_Q = 2,135753$ [Quetzales/kW-h] (Energuate), siendo el consumo:

$$C_c = 53,50 * 2,27609984 * 12 = 1\ 461,2560$$

3.7. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos deben tener poca incerteza en cuanto a los datos obtenidos directamente de la medición de campo, así también de los cálculos realizados mediante tablas y fórmulas. Para obtener un número de corridas o repeticiones en cuanto a la medición de las diferentes variables utilizadas en la investigación, el número de estas fue obtenido a partir de la ecuación:

$$N = \frac{\frac{Z_{\alpha}^2}{2} * \lambda * q}{E^2}$$

[Ecuación 16]

Donde:

N = número de corridas

$Z_{\alpha}/2$ = nivel de confianza (según tablas de distribución normal $Z=1.96$)

λ = probabilidad de éxito [%]

q = probabilidad de fracaso [%]

E = error máximo [%]

- Análisis de la toma de datos para el aforo volumétrico

Se determinó el número de corridas para el aforo volumétrico bajo una probabilidad de éxito $\lambda=95$ %, entonces se tendrá una probabilidad de fracaso $q= 5$ % y se desea que el error máximo sea del 20 %, utilizando la ecuación 16, se tiene:

$$N = \frac{(1,96)^2 * 0,95 * 0,05}{(0,20)^2} = 4,5619 \approx 5$$

Por lo que se trabajó con 5 corridas de mediciones de tiempo.

- Análisis de la medición del consumo de energía eléctrica

Se determinó el número de corridas para la medición del consumo de energía eléctrica durante un período treinta días, ya que este es el intervalo regular de tiempo para la facturación y cobro por parte de la empresa que presta el servicio. Este análisis fue realizado con una probabilidad de éxito $\lambda = 95 \%$, entonces se tendrá una probabilidad de fracaso $q = 5 \%$ y se desea que el error máximo sea del 45 %, utilizando la ecuación 16, se tiene:

$$N = \frac{(1,96)^2 * 0,95 * 0,05}{(0,45)^2} = 0,9011 \approx 1$$

Por lo que se trabajó con 1 corrida en la medición de consumo de energía eléctrica para cada bomba.

4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados que se muestran a continuación revelan el comportamiento de la eficiencia de las bombas hidráulicas con diferente control de arranque y paro, una comparación de sus eficiencias determinadas teórica y experimentalmente, un detalle del costo de montaje y operación para cada una, y por último un balance energético para cada bomba utilizada en la investigación.

Tabla XVII. **Eficiencia experimental de bomba centrífuga controlada por electroniveles**

Eficiencia (%)
63,60

Fuente: elaboración propia, basada en ecuación 12.

Tabla XVIII. **Eficiencia experimental de bomba con sistema hidroneumático**

Eficiencia (%)
52,70

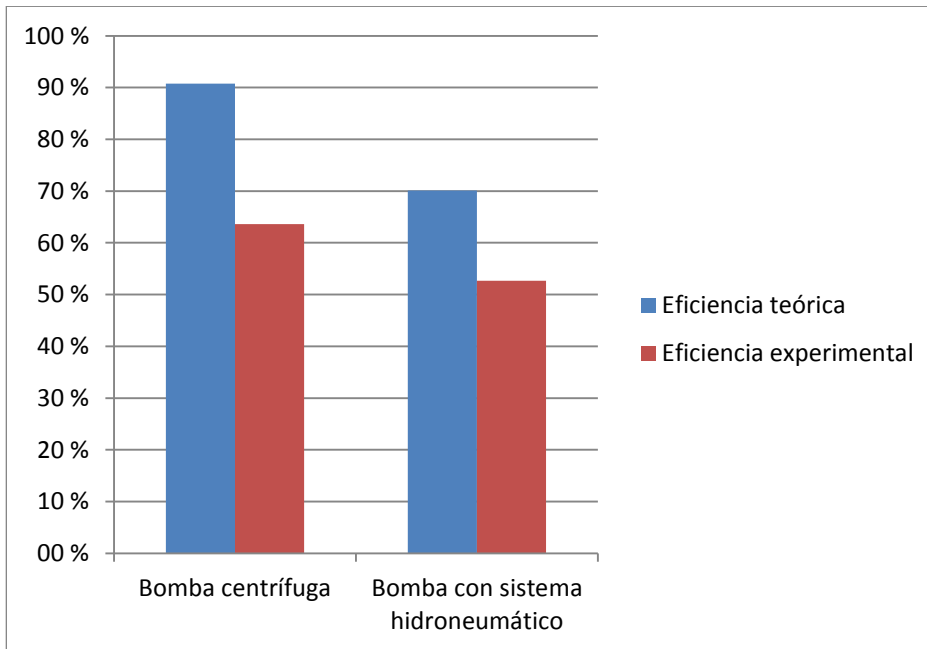
Fuente: elaboración propia, basada en ecuación 12.

Tabla XIX. **Eficiencia teórica y experimental**

	Eficiencia teórica [%]	Eficiencia experimental [%]
Bomba centrífuga	90,73	63,60
Bomba con sistema hidroneumático	70,13	52,70

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Comparación de la eficiencia de los sistemas**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Excel 2010.

- Costo de montaje y operación de los sistemas de bombeo

El análisis para la instalación de un sistema de bombeo no solo viene determinado a partir de la eficiencia de los equipos, sino también por la inversión que debe hacerse en el momento de la adquisición del mismo, así como el gasto que este producirá en la facturación de los servicios utilizados para el transporte de los fluidos. La inversión total del precio en quetzales para la obtención del equipo utilizado para llevar a cabo la investigación viene desglosada en la tabla IV, esta tabla describe generalmente los equipos utilizados para el montaje y medidores adquiridos para la investigación. En las tablas XX y XXI se resumirán los equipos y accesorios utilizados para el montaje de cada sistema de bombeo.

Tabla XX. **Costo de montaje de sistema hidroneumático**

Sistema de bomba centrifuga controlada por electroniveles			
Cantidad	Descripción	Precio unitario	Total
1	Sistema hidroneumático de ½ HP y 24 litros de capacidad del tanque presurizado, marca Sta-rite (costo de instalación incluida)	Q. 1 750,00	Q. 1 750,00
1	Cisterna subterránea para agua, de concreto, capacidad de 20 toneles, (mano de obra incluida)	Q. 7 800,00	Q. 7 800,00
--	Tubería y accesorios P.V.C.	Q. 100,00	Q. 100,00
1	Tablero eléctrico, marca G.E.	Q. 82,00	Q. 82,00
1	Flip-on 1 x 20 A, marca G.E.	Q. 30,00	Q. 30,00
10	Metros de cable AWG #12	Q.2,86	Q.28,60
5	Metros de flexitubo 3/4"	Q. 3,50	Q. 17,50
1	Bote pegamento para P.V.C.	Q. 24,00	Q. 24,00
			Q. 9 832,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Costo de montaje de sistema tanque a tanque**

Sistema de bomba centrífuga controlada por electroniveles			
Cantidad	Descripción	Precio unitario	Total
1	Bomba centrífuga ½ HP, marca Sta-rite	Q. 475,00	Q. 475,00
1	Cisterna subterránea para agua, de concreto, capacidad de 20 toneles, (mano de obra incluida)	Q. 7 800,00	Q. 7 800,00
2	Electroniveles 100-250 voltios, marca Sassin	Q. 125,00	Q. 250,00
1	Tanque de almacenamiento 1100 litros, marca Talishte	Q. 1 150,00	Q. 1 150,00
--	Tubería y accesorios P.V.C.	Q. 100,00	Q. 100,00
1	Tablero eléctrico, marca G.E.	Q. 82,00	Q. 82,00
1	Flip-on 1 x 20 A, marca G.E.	Q. 30,00	Q. 30,00
10	Metros de cable AWG #12	Q.2,86	Q.28,60
5	Metros de flexitubo 3/4"	Q. 3,50	Q. 17,50
1	Bote pegamento para P.V.C.	Q. 24,00	Q. 24,00
--	Mano de obra	Q. 400,00	Q. 400,00
			Q. 10 357,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Costos de operación**

	Costo mensual [Quetzales]	Costo anual [Quetzales]
Bomba centrífuga control mediante electroniveles	96,28	1 155,36
Bomba con sistema hidroneumático	121,77	1 461,26

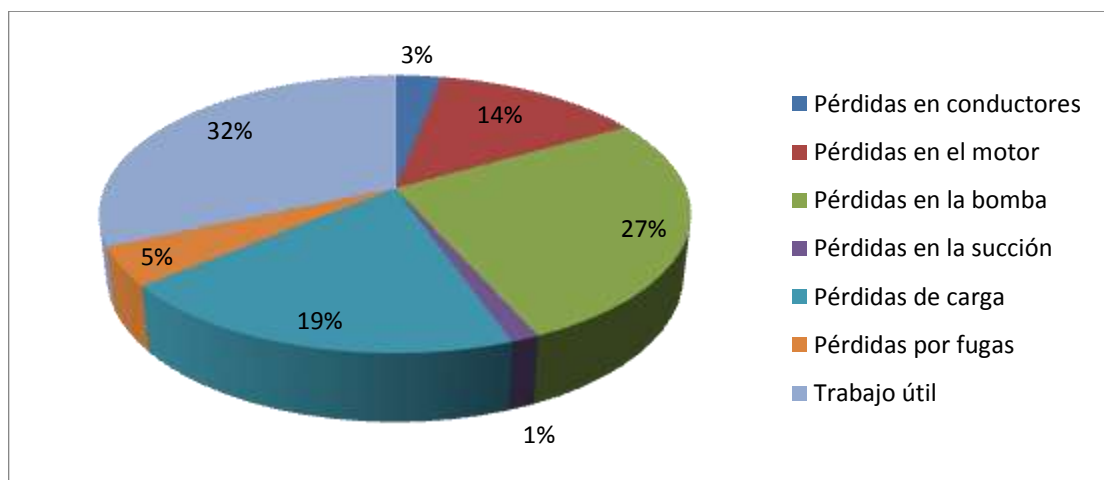
Fuente: elaboración propia.

- Balance energético de los sistemas de bombeo

El objetivo del balance energético es determinar los dispositivos del sistema de bombeo en los cuales se registran los mayores consumos de energía, en este caso se determina desde la fuente de voltaje y la potencia que este suministra al motor eléctrico, hasta el trabajo útil en el último tramo de la tubería de descarga de los sistemas de bombeo.

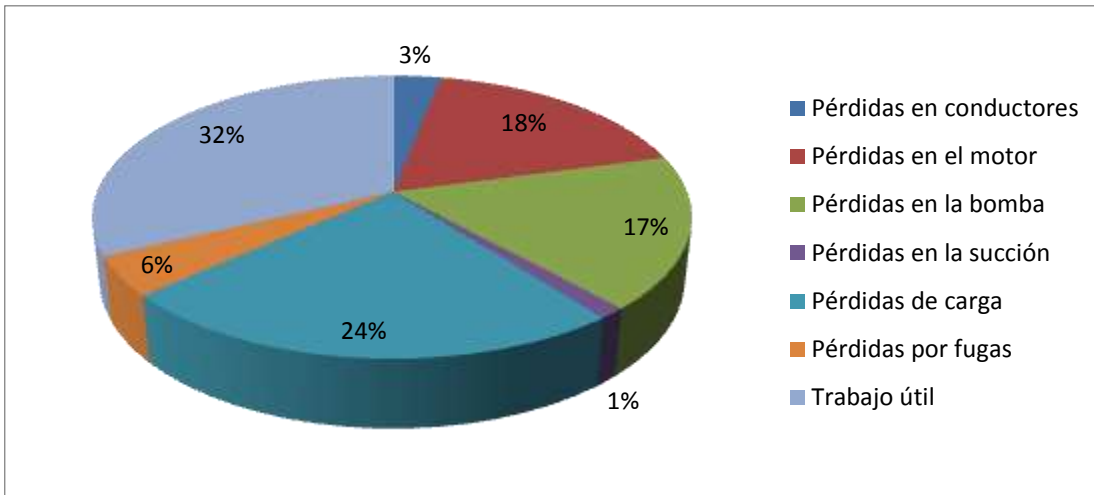
El balance energético para cada sistema se determinó de acuerdo a la eficiencia anteriormente calculada para cada bomba. Asimismo, se promediaron las pérdidas en los conductores y motor eléctrico, las pérdidas por fugas en el sistema de tuberías y pérdidas en la succión; proyectando las siguientes gráficas los balances energéticos para los dos sistemas de bombeo utilizados en la investigación.

Figura 13. **Balance energético del sistema de bombeo de bomba centrífuga controlada por electroniveles**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Excel 2010.

Figura 14. **Balance energético del sistema hidroneumático**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Excel 2010.

Las tablas XVII y XVIII muestran la eficiencia de cada bomba utilizada en los sistemas de bombeo empleados durante la investigación, bajo la misma condición de servicio, el mismo diseño hidráulico y la misma potencia al eje en cada una de ellas. Se puede afirmar que la eficiencia de una bomba depende intrínsecamente de la carga hidráulica y del caudal que estas proporcionan al circuito hidráulico, siendo la eficiencia una variable para las diferentes condiciones de servicio. Para esta investigación la eficiencia encontrada se determinó para un servicio domiciliario urbano, ya que el circuito hidráulico y los sistemas de bombeo se instalaron para una condición donde la carga solamente debe sufragar la necesidad de un domicilio de dos niveles. Para otros casos donde la potencia demandada es mayor pueden utilizarse las ecuaciones experimentales utilizadas durante la investigación, basándose en el diseño experimental de la misma.

La tabla XIX hace la comparación de la eficiencia teórica con la eficiencia experimental. La eficiencia teórica fue obtenida directamente de los datos que brinda el fabricante, donde las condiciones ideales de carga y caudal permiten que la bomba tenga un punto máximo de eficiencia. La eficiencia experimental se obtuvo bajo condiciones de carga normales y aplicados al diseño de un circuito hidráulico que repercutió directamente en los resultados obtenidos. Por lo que se concibe un resultado bastante aceptable comparando gráficas que muestran el comportamiento energético general de bombas hidráulicas en el anexo 4, con el comportamiento real basado en el diseño experimental proyectado por la figura 12.

La tabla XX y XXI muestran el resultado del costo de la inversión inicial total en quetzales, para cada sistema de bombeo. Obtenido directamente de varias licitaciones obtenidas mediante la visita a empresas que se encargan de la distribución del equipo hidráulico de baja potencia.

La tabla XXII muestra el costo de operación de cada sistema de bombeo, el cual es facturado por la empresa eléctrica (Energuate: sector Centro Occidente II). Donde el consumo mide 1 kW por cada hora de utilización, variable la cual tiene un costo de Q. 2,27609984, cobro establecido para usuarios que exceden el consumo de 100 kW/mes. El consumo fue medido mediante un contador eléctrico análogo, el cual registró el consumo durante un período de 30 días equivalentes a un mes de servicio, obteniendo cifras de consumo bastante aceptables en el rango de la potencia eléctrica que genera el conjunto motor-bomba.

Las figuras 13 y 14 muestran un balance energético mediante una gráfica de pastel, donde se desglosan en porcentaje las pérdidas de energía que producen los diferentes elementos que componen la instalación de cada

sistema de bombeo. En comparación con balance energético general de sistemas de bombeo, se pudo observar que la energía útil a la descarga de la bomba es bastante aceptable, pudiéndose aún, llegar a un porcentaje mayor. Debido al diseño de la tubería de descarga con diámetros pequeños para los sistemas de bombeo, las pérdidas de carga repercuten un 19 % y 24 % respectivamente, valores bastante altos, donde se concentran las mayores pérdidas en la instalación. Obteniéndose valores permisibles y aceptables para los demás elementos que representan pérdidas a lo largo toda la instalación.

CONCLUSIONES

1. La eficiencia obtenida mediante procedimientos y fórmulas experimentales de la bomba centrífuga controlada por medio de electroniveles fue del 63,60 %.
2. La eficiencia obtenida mediante procedimientos y fórmulas experimentales de la bomba centrífuga con sistema hidroneumático fue del 52,70 %.
3. La eficiencia teórica se establece mediante los datos provistos por el fabricante, y está limitada bajo condiciones ideales de servicio. Por lo que la eficiencia experimental se reducirá por las condiciones reales de trabajo y las respectivas pérdidas en el sistema. La eficiencia de la bomba centrífuga controlada por electroniveles tuvo una diferencia de 24,4 % con respecto a su eficiencia teórica. Así también la bomba con sistema hidroneumático tuvo un descenso del 17,43 % con respecto su eficiencia teórica.
4. El costo del montaje para el sistema de bomba centrífuga controlada por electroniveles promedió una inversión total de Q. 10 357,10 y un costo de operación por año de Q. 1 155,36. Utilizándose únicamente un 32 % de la energía total que ingresa al sistema.
El costo del montaje para el sistema de bomba con sistema hidroneumático promedió una inversión total de Q. 9 832,10 y un costo de operación por año de Q. 1 461,26. Utilizándose únicamente un 32 % de la energía total que ingresa al sistema.

RECOMENDACIONES

1. Para el diseño del circuito hidráulico, instalar tuberías en la descarga de la bomba con diámetros como mínimo de una pulgada, para poder reducir las pérdidas por fricción y así aumentar la eficiencia de la bomba que dará presión al fluido.
2. Utilizar la ecuación de Hazen-Williams para diámetros que excedan las dos pulgadas de diámetro, para la determinación de pérdidas por fricción a lo largo de las tuberías empleadas en el sistema hidráulico.
3. Debido a la reducción de la eficiencia teórica o de operación bajo la misma condición de servicio, muy parecida entre los dos sistemas analizados, por el gasto energético y debido al costo del montaje poco variable, se recomienda instalar el sistema de bombeo tanque a tanque para una instalación hidráulica de mediana a baja potencia.
4. Realizar un plan de reducción de energía disipada no aprovechada durante el proceso, utilizando un manual de eficiencia energética de sistemas de bombeo, para evaluar con detalle todos los elementos que representan pérdidas en la instalación del sistema de bombeo, identificando así las oportunidades de ahorro energético.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACOSTA ÁLVAREZ, Guillermo; ACEVEDO, Neto J.M. *Manual de hidráulica*. México: Harla, 1975. 578 p.
2. BID, Banco Interamericano de Desarrollo. *Evaluación para sistemas de bombeo de agua: manual de eficiencia energética*. Washington: BID, 2011. 108 p.
3. CARTER, Roy; KARASSIK, Igor J. *Bombas centrífugas: selección, operación y mantenimiento*. México: Continental, 1967. 560 p.
4. DUARTE AGUDELO, Carlos Arturo. *Mecánica de fluidos e hidráulica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011. 308 p. ISBN: 9789587196849.
5. FERNÁNDEZ FIGUEROA, Francisco Javier. *Guía general para el cálculo, instalación y mantenimiento de bombas hidroneumáticas*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 132 p.
6. GILES, Ronald V. *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. 2 ed. México: Mc-Graw Hill, 1991. 273 p. Schaum.
7. MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. España: Harper y Row, 1976. 583 p.

8. MCNAUGHTON, Kenneth J. *Bombas: selección uso y mantenimiento*. México: McGraw-Hill, 1989. 373 p.
9. MENÉNDEZ BARRIENTOS, Carlos Fernando. *Selección de equipo de bombeo, funcionamiento y mantenimiento*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1998. 120 p.
10. PONCE VICTORIA, Fernando. *Manual para ensayo de pérdidas de energía en accesorios de tubería del laboratorio de hidráulica*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 73 p.
11. RODRÍGUEZ SOSA, Luis Carlos. *Guía para instalaciones sanitarias en edificios*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2007. 129 p.
12. ROSEMBERG Milton. *Curso de electricidad básica por instrucción programada*. De Vedia, Enrique Molina (trad.). Buenos Aires: Centro Regional de Ayuda Técnica, 1969. 253 p.
13. SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. México: Limusa, 1997. 557 p.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de propiedades físicas

Tabla XXIII. Propiedades físicas del agua

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA							
Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (kN/m ²)	Viscosidad dinámica (N·s/m ²)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kN/m ²)
0	9,805	999,8	1,98 · 10 ⁶	1,781 · 10 ⁻³	1,785 · 10 ⁻⁶	0,0765	0,61
5	9,807	1000,0	2,05 · 10 ⁶	1,518 · 10 ⁻³	1,519 · 10 ⁻⁶	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	2,10 · 10 ⁶	1,307 · 10 ⁻³	1,306 · 10 ⁻⁶	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	2,15 · 10 ⁶	1,139 · 10 ⁻³	1,139 · 10 ⁻⁶	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	2,17 · 10 ⁶	1,102 · 10 ⁻³	1,003 · 10 ⁻⁶	0,0728	2,34
25	9,777	997,0	2,22 · 10 ⁶	0,890 · 10 ⁻³	0,893 · 10 ⁻⁶	0,0720	3,17
30	9,764	995,7	2,25 · 10 ⁶	0,708 · 10 ⁻³	0,800 · 10 ⁻⁶	0,0712	4,24
40	9,730	992,2	2,28 · 10 ⁶	0,653 · 10 ⁻³	0,658 · 10 ⁻⁶	0,0696	7,38
50	9,689	988,0	2,29 · 10 ⁶	0,547 · 10 ⁻³	0,553 · 10 ⁻⁶	0,0679	12,33
60	9,642	983,2	2,28 · 10 ⁶	0,466 · 10 ⁻³	0,474 · 10 ⁻⁶	0,0662	19,92
70	9,589	977,8	2,25 · 10 ⁶	0,404 · 10 ⁻³	0,413 · 10 ⁻⁶	0,0644	31,16
80	9,530	971,8	2,20 · 10 ⁶	0,354 · 10 ⁻³	0,364 · 10 ⁻⁶	0,0626	47,34
90	9,466	965,3	2,14 · 10 ⁶	0,315 · 10 ⁻³	0,326 · 10 ⁻⁶	0,0608	70,10
100	9,399	958,4	2,07 · 10 ⁶	0,282 · 10 ⁻³	0,294 · 10 ⁻⁶	0,0589	101,33

Fuente: <<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Aguas/PropiedadesFisicasAgua.asp>>

[Consulta: julio de 2014].

Anexo 2. **Tabla de propiedades de materiales**








Tabla XXIV. **Rugosidad absoluta de materiales**

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES				
Material	ϵ (mm)		Material	ϵ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015		Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01		Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024		Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015		Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024		Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024		Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003		Hormigón	0,3-3,0








Fuente:<<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Aguas/PropiedadesFisicasAgua.asp>>
[Consulta: julio de 2014].

Anexo 3. Pérdidas localizadas

Figura 15. Pérdidas por fricción en accesorios

Diámetro nominal de los caños normales		PERDIDAS POR FRICCIÓN EN ACCESORIOS (LONGITUD EQUIVALENTE DE CAÑO RECTO DEL MISMO DIAMETRO EN METROS)						
		 VALVULA ESCLUSA TOTALMENTE ABIERTA	 VALVULA GLOBO TOTALMENTE ABIERTA	 VALVULA ANGULO TOTALMENTE ABIERTA	 VALVULA DE RETENCION	 CODDO NORMAL O TE DE 6 MM DE REDUCCION	 CURVA NORMAL O TE NORMAL	 TE NORMAL
mm	Pulg.							
12	1/2	0,12	5,18	2,44	1,22	0,46	0,3	1
19	3/4	0,15	6,71	3,36	1,83	0,61	0,45	1,37
25	1	0,18	8,24	4,27	2,44	0,82	0,52	1,74
32	1 1/4	0,24	11	5,49	3,66	1,07	0,7	2,32
38	1 1/2	0,3	13,12	6,71	4,27	1,31	0,82	2,74
51	2	0,36	16,78	8,24	5,8	1,68	1,07	3,66
63	2 1/2	0,43	20,43	10,06	7,01	1,98	1,28	4,27
76	3	0,52	25,01	12,5	9,76	2,44	1,59	5,18
102	4	0,7	33,55	16,16	13,12	3,36	2,14	6,71
127	5	0,88	42,7	21,35	17,69	4,27	2,74	8,24
152	6	1,07	51,85	24,4	20,74	4,88	3,36	10
203	8	1,37	68,02	36,6	-	6,1	4,27	13,12
254	10	1,77	85,4	42,7	-	7,93	5,18	16,16
305	12	2,07	100,65	48,8	-	9,76	6,1	20,74
356	14	2,44	115,9	58	-	11,28	7,32	23,79
406	16	2,74	134,2	67,1	-	12,81	8,24	26,84

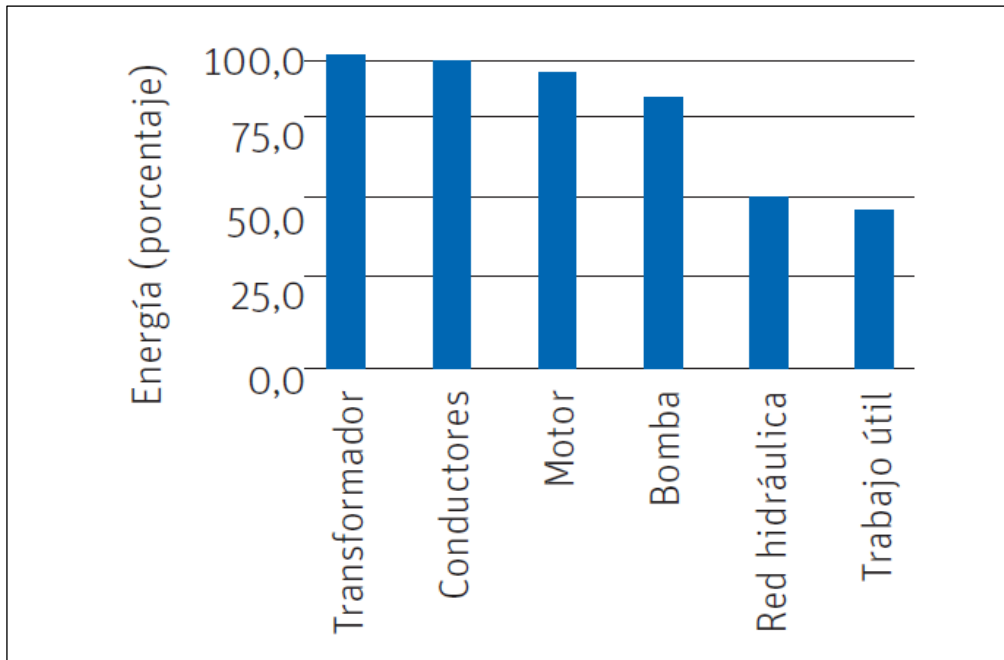
UNA VALVULA DE PIE PUEDE SER DESPRECIADA SI SU SECCION DE PASAJE ESTA BIEN DIMENSIONADA

Diámetro nominal de los caños normales		 TE NORMAL CON SALIDA LATERAL	 CODDO 45°	 CODDO 180°	 ENSANCHAMIENTO BRUSCO	 CONTRACCION BRUSCA	 ENTRADA ORDINARIA	 ENTRADA DE BORDA
		mm	Pulg.					
12	1/2	1	0,24	1,09	0,3	0,18	0,27	0,49
19	3/4	1,37	0,3	1,52	0,45	0,24	0,4	0,61
25	1	1,74	0,4	1,83	0,52	0,3	0,46	0,76
32	1 1/4	2,32	0,51	2,53	0,7	0,4	0,61	1,04
38	1 1/2	2,74	0,61	3,05	0,82	0,45	0,73	1,22
51	2	3,66	0,76	3,96	1,07	0,58	0,91	1,52
63	2 1/2	4,27	0,92	4,58	1,28	0,67	1,1	1,83
76	3	5,18	1,16	5,49	1,59	0,85	1,37	2,38
102	4	6,71	1,52	7,32	2,14	1,16	1,83	3,26
127	5	8,24	1,92	9,46	2,74	1,43	2,29	4,12
152	6	10	2,29	11,28	3,36	1,77	2,74	4,7
203	8	13,12	3,05	15,55	4,27	2,29	3,96	6,07
254	10	16,16	3,96	18,6	5,18	3,05	4,58	7,47
305	12	20,74	4,58	22,57	6,1	3,66	5,49	9,09
356	14	23,79	5,18	25,92	7,32	3,96	6,1	10,64
406	16	26,84	5,8	30,5	8,24	4,58	7,02	12,2

Fuente: <<http://www.leonindustrial.com.ar/backend/archivos/PERDIDAS%20POR%20FRICCIÓN.pdf>> [Consulta: julio de 2014].

Anexo 4. Pérdidas de energía

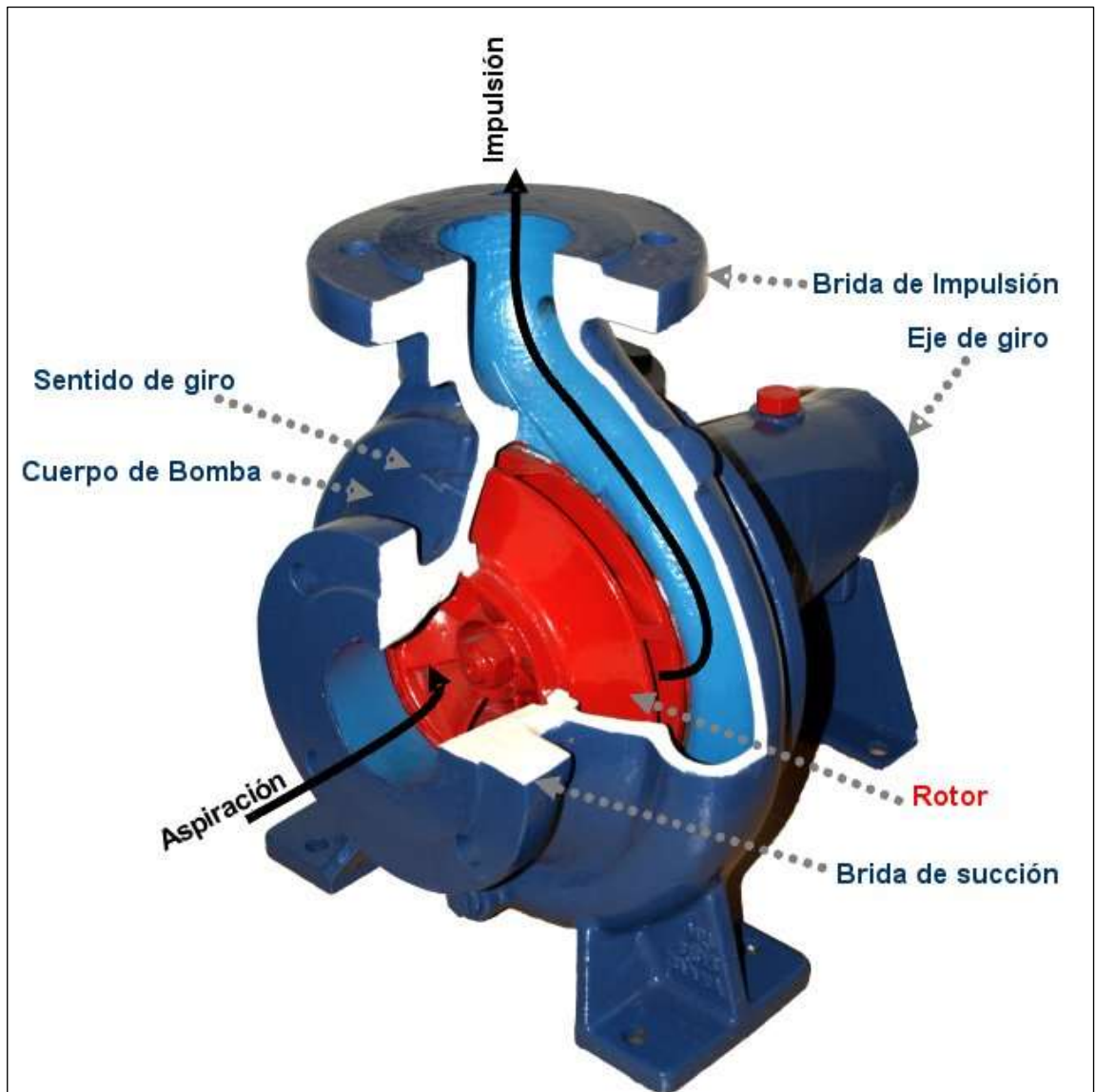
Figura 16. Pérdidas energéticas típicas en los componentes electromecánicos de un sistema de agua



Fuente: < <http://www10.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2011/08952.pdf> > [Consulta: julio de 2014].

Anexo 5. Bomba centrífuga

Figura 17. Funcionamiento y componentes de bomba centrífuga



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_centric%C3%ADfuga> [Consulta: julio de 2014].

Anexo 6. **Bomba con sistema hidroneumático**

Figura 18. **Componentes de bomba con sistema hidroneumático**



Fuente: < <http://www.jaflorez.com/equiposhidro.html> > [Consulta: julio de 2014].