

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA EL BANCO DE  
CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE DE LÍQUIDOS**

**DIANA CAROLINA MARTÍNEZ REYES**

**GERMÁN ANDRÉS PLATA TOBACIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA EL BANCO DE  
CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE DE LÍQUIDOS**

**DIANA CAROLINA MARTÍNEZ REYES**

**GERMÁN ANDRÉS PLATA TOBACIA**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director:**

**JAVIER RUGELES**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **DEDICATORIA**

A Dios Todopoderoso, mi guía.

A mis padres por el amor y la fortaleza.

A mis hermanos Marcela y David.

A mis amigos quienes acompañaron cada parte de este proceso y este proyecto que hoy se convierte en un gran logro.

A Ari.

Diana.

## **DEDICATORIA**

A Dios porque de Él fue la idea.

A mi mamá por su increíble perseverancia y valentía.

A mis tíos.

A mis nonos.

A todos los compañeros y amigos que de una u otra manera contribuyeron a la formación de mi carácter.

A Lina y a Johana.

Germán.

## **AGRADECIMIENTOS**

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica por su pasión en el proceso de enseñanza de la ingeniería.

A la División de Mantenimiento Tecnológico en cabeza del Ing. Jabid Quiroga por su colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A Pedro Emilio Caldas por su disposición y paciencia.

Al profesor Javier Rugeles por su apoyo y aporte intelectual.

Al laboratorio de Automatización Industrial.

Al profesor Alfonso García Castro.

Al profesor Omar Armando Gelvez por su disposición y proactividad a la hora de resolver problemas y aportar al crecimiento personal de los estudiantes.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	20
1. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE DE LÍQUIDOS....	21
1.1 SUBSISTEMA DE IMPULSIÓN.....	21
1.1.1 Bombas Centrífugas .....	23
1.1.1.1 Punto de Operación y Altura “Shut Off” .....	24
1.1.1.2 Configuración de un Grupo de Bombas .....	26
1.2 SUBSISTEMA DE TRANSPORTE.....	27
1.2.1 Tuberías y Pérdidas de Carga.....	27
1.2.2 Válvulas y Accesorios .....	29
1.3 SUBSISTEMA DE SENSADO.....	31
1.3.1 Transmisores de Presión y Manómetros .....	31
1.3.2 Flujómetros .....	32
1.4 REGULACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSPORTE DE LÍQUIDOS .....	33
1.4.1 Depósitos de Reserva .....	33
1.4.2 Arranque o Parada de Bombas .....	34
1.4.3 Válvulas de Regulación .....	35
1.4.4 Variación de Velocidad de Giro de las Bombas.....	36
2. MARCO TEÓRICO CONTROL .....	37
2.1 NORMAS, SIMBOLOGÍA Y ESTÁNDARES .....	37
2.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MONITOREO .....	37
3. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DISPONIBLES EN EL BANCO .....	39
3.1 PLC SIEMENS S7-1200 .....	39
3.1.1 Funciones del PLC .....	39
3.2 VARIADOR DE FRECUENCIA .....	41
3.2.1 Funciones del Variador de Frecuencia .....	42
3.3 BOMBAS.....	43
3.3.1 Funciones del Grupo de Bombas.....	44
3.4 TRANSMISORES DE PRESIÓN .....	45
3.4.1 Transmisores de Succión y Descarga .....	45

3.4.2	Transmisor Diferencial.....	46
3.5	TUBERÍAS Y VÁLVULAS .....	49
3.6	FLUJÓMETRO.....	52
3.6.1	Conexión.....	52
3.6.2	Configuración .....	53
4.	DESCRIPCIÓN Y MONTAJE GENERAL .....	54
4.1	ADECUACIÓN DEL TABLERO DE CONTROL .....	54
4.2	CONEXIÓN MOTOR-VARIADOR DE FRECUENCIA.....	57
4.3	CONEXIÓN INSTRUMENTACIÓN-PLC .....	58
5.	ADQUISICIÓN DE SEÑALES .....	59
5.1	LEVANTAMIENTO DE SEÑALES .....	59
5.2	NARRATIVA DEL PROCESO.....	59
5.3	P&ID's .....	60
5.4	TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES Y MUESTREO.....	61
5.5	PROGRAMACIÓN EN ENTORNO LABVIEW.....	64
5.5.1	Comunicación Mediante OPC .....	64
5.5.2	NI OPC SERVERS 2012.....	65
5.5.3	Configuración Servidor OPC.....	65
5.5.4	Configuración Cliente OPC .....	66
5.5.5	Procedimiento Lógico Conexión LABVIEW – OPC utilizando I/O Server .....	67
5.5.6	Programación Panel Frontal .....	69
5.5.7	Programación Diagrama de Bloques.....	70
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	72
6.1	MUESTREO GRAFICO DE RESULTADOS .....	72
6.2	VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	75
6.2.1	Bomba Centrífuga Motor Monofásico Regulación Con Válvula En La Descarga.....	75
6.2.2	Bomba Centrífuga Motor Trifásico Regulación Con Válvula En La Descarga .....	79
6.2.3	Bomba Centrífuga Motor Trifásico Regulación Con Variador de Frecuencia .....	81
6.2.3.1	Bomba Centrífuga Motor Trifásico Regulación Con Variador de Frecuencia válvula en la descarga totalmente abierta .....	81

6.2.3.2 Bomba Centrifuga Motor Trifásico Regulación Con Variador de Frecuencia válvula en la descarga 50% de apertura .....	82
6.2.4 Bombas Acopladas En Serie .....	83
6.2.5 Bombas Acopladas En Paralelo .....	87
6.2.6 Caracterización de pérdidas en red de tuberías.....	88
CONCLUSIONES .....	90
RECOMENDACIONES .....	92
BIBLIOGRAFÍA .....	93
ANEXOS .....	95

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Leyes de semejanza de bombas	25
Tabla 2. Datos característicos bombas	43
Tabla 3. Funciones manejo mediante teclas	48
Tabla 4. Descripción técnica equipos	54
Tabla 5. Datos curva característica bomba	73
Tabla 6. Datos eléctricos bomba	74
Tabla 7. Datos caracterización perdidas	74
Tabla 8. Datos pérdidas de flujo línea 1	89

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bombas de desplazamiento positivo	21
Figura 2. Aditamentos de seguridad	22
Figura 3. Bomba Centrífuga	23
Figura 4. Curva de Operación de una Bomba Centrífuga	23
Figura 5. Punto de Operación y Shut off	24
Figura 6. Curvas de una Bomba Centrífuga	25
Figura 7. Configuración en serie	26
Figura 8. Configuración en paralelo	26
Figura 9. Pérdida de Carga	27
Figura 10. Pérdida por Accesorio	30
Figura 11. Coeficientes K de pérdidas en accesorios	30
Figura 12. Tubo de Bourdon1	31
Figura 13. Flujómetro de Turbina	32
Figura 14. Regulación mediante depósito de suministro	34
Figura 15. Uso válvula de regulación	35
Figura 16. Efecto producido por la Válvula en la Curva del Sistema	35
Figura 17. Regulación con Variador Vs Regulación con Válvula	36
Figura 18. PLC S7-1200	39
Figura 19. Variador de frecuencia Siemens G110	41
Figura 20. Bomba Ecojet	43
Figura 21. Transmisor de succión	45
Figura 22. Transmisor de descarga	45
Figura 23. Ubicación del teclado	47
Figura 24. Carga margen de medida	48
Figura 25. Red de tuberías y válvulas	49
Figura 26. Red de tuberías	50
Figura 27. Detalle tubería	50
Figura 28. Flujómetro	52

Figura 29. Flujómetro con salida de señal	52
Figura 30. Flujómetro sin salida de señal	53
Figura 31. Diagrama de control	55
Figura 32. Diagrama de potencia	55
Figura 33. Disposición final tablero de control	56
Figura 34. Conexión motor trifásico-variador	57
Figura 35. Conexión instrumentación-PLC	58
Figura 36. P&ID's.	60
Figura 37. Pantalla crear programa STEP 7	61
Figura 38. Selección dispositivo a programar	62
Figura 39. Creación de variables STEP 7	62
Figura 40. Bloque Normalizar_X STEP 7	63
Figura 41. Bloque escalar_X STEP 7	63
Figura 42. Comunicación PLC - PC cable Ethernet	64
Figura 43. Esquema servidor OPC – cliente OPC	65
Figura 44. Configuración servidor OPC	66
Figura 45. Visualización cliente OPC	67
Figura 46. Creación I/O server LABVIEW	68
Figura 47. Enlazado variables compartidas - LABVIEW	68
Figura 48. Panel frontal LABVIEW	69
Figura 49. Herramienta while loop LABVIEW	70
Figura 50. Herramienta write to measurement file LABVIEW	70
Figura 51. Diagrama de bloques	71
Figura 52. Curva característica bomba motor monofásico	75
Figura 53. Curva bomba centrífuga según fabricante	76
Figura 54. Potencia eléctrica bomba motor monofásico	77
Figura 55. Eficiencia esperada bombas a diferente velocidad específica	78
Figura 56. Eficiencia global bomba motor monofásico	78
Figura 57. Curva característica bomba motor trifásico regulación con válvula	80
Figura 58. Eficiencia global bomba motor trifásico	80
Figura 59. Bomba centrífuga regulación con variador válvula full open	81

Figura 60. Bomba centrífuga regulación con variador válvula half open	82
Figura 61. Familia de curvas bomba centrífuga – sistema	83
Figura 62. Curva característica bombas en serie	84
Figura 63. Potencia eléctrica bombas en serie	85
Figura 64. Eficiencia global bombas en serie	86
Figura 65. Bombas centrífugas distintas en paralelo	87
Figura 66. Caracterización pérdidas línea 1	88

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Práctica bombas centrífugas	96
ANEXO B. Práctica configuración de bombas	107
ANEXO C. Práctica pérdidas de carga	115
ANEXO D. Configuración del flujómetro	123
ANEXO E. Configuración del variador de frecuencia	124
ANEXO F. Datos obtenidos experimentalmente en las prácticas	127

## RESUMEN

**TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA EL BANCO DE CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE DE LÍQUIDOS\***

**AUTORES:**

Diana Carolina Martínez Reyes  
Germán Andrés Plata Tobacia \*\*

**PALABRAS CLAVES:**

Transporte, líquidos, monitoreo, PLC, LABVIEW, bombas, caracterización.

**DESCRIPCIÓN:**

El objetivo de este trabajo es brindar a la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander la implementación de un sistema de monitoreo para el análisis y caracterización de sistemas de transporte de líquidos.

El proyecto comprende la adecuación de equipos sensores y controladores tales como transmisores de presión, flujómetro, un controlador lógico programable (PLC) y un variador de frecuencia con el fin de mostrar gráficamente las curvas características de los sistemas a través del software LABVIEW. Para tal fin, se adecúa un tablero de control para ubicar los equipos, se programa un PLC siemens S7 1200 y se comunica con el software de muestreo (LABVIEW) mediante un servidor OPC. Adicionalmente se ajustan los equipos sensores disponibles y se añade un variador de frecuencia siemens G110 a una de las bombas para realizar regulación de flujo.

El resultado es un banco con sistema de monitoreo mediante el cual se analizan los fenómenos asociados con bombas centrífugas, redes hidráulicas, pérdidas de carga, potencia hidráulica y rendimiento de equipos de transporte de líquidos. Adicionalmente se brinda un entorno didáctico para la realización de prácticas que permitan afianzar conceptos teóricos, el cual permite también la recuperación y mejora del banco.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica,  
Ing. Javier Rugeles

## SUMMARY

**TITLE: IMPLEMENTATION OF A MONITORING SYSTEM FOR THE LIQUID TRANSPORTATION SYSTEMS BENCH\***

**AUTHORS:**

Diana Carolina Martínez Reyes  
Germán Andrés Plata Tobacia \*\*

**KEY WORDS**

Monitoring, PLC, pumps, transportation, laboratory, tests, fluids, LABVIEW

**DESCRIPTION**

The main goal of this job is to give to the Mechanical Engineering school an implementation of a monitoring and analysis system applied on the liquid transportation systems bench. This project comprises transducer's and controllers adaptation such as pressure transmitters, flow-meter, programmable logic controller (PLC) and a frequency inverter to graphically show operation curves of the systems through LABVIEW. For this purpose it's necessary to proportionate a control board, programme a siemens S7 1200 PLC and communicate it with LABVIEW through the use of an OPC server. Additionally, a siemens G110 frequency inverter is added to one of the two pumps to regulate the liquid flow through the system.

The result is a bench with a monitoring system that allow to analyze phenomenons related with centrifugal pumps, hydraulic networks, load losses, hydraulic power and liquid transport equipment efficiency. As a plus, didactic practices and environment are given to secure the theoretical knowledge and the recovery of the bench focusing on improving it.

---

\* Degree work

\*\* Physical-Mechanical engineering faculty, Mechanical Engineering, Eng. Javier Rugeles

## INTRODUCCIÓN

A través de la historia, las necesidades que el ser humano ve en un sistema han variado con el tiempo. Mientras que antes lo que se buscaba era cumplir una tarea o propósito a como diera lugar, hoy en día hay que analizar diversos aspectos como consumo energético, qué tan verde es el sistema, cuánto costará mantenerlo en marcha etc. Existen estándares que una compañía o planta deben cumplir para poder ser acreditados y por tanto, competitivos en la industria.

El banco de caracterización de sistemas de transporte de líquidos, presenta un entorno didáctico mediante el cual se brinda al usuario detalles indispensables en el ámbito de la hidráulica, redes de tuberías, turbo-maquinaria y sistemas de muestreo, los cuales serán indispensables a la hora de seleccionar un equipo u otro en el campo de la industria y determinar cuál es la mejor elección en cuanto a ahorro energético se refiere, eficiencia, confort, mantenimiento etc.

Este trabajo presenta un medio didáctico a través del cual se puede conocer cómo funcionan las redes de tuberías y las bombas centrífugas, sus características principales y curvas, las cuales se muestran a través de un sistema de monitoreo en tiempo real. Un acercamiento se hace hacia dispositivos sensores como transmisores de presión y Flujómetros, los cuales pueden ser adaptados a un controlador lógico programable (PLC).

Se puede decir hoy en día que un sistema que no se controla a sí mismo o no es automatizado, es obsoleto o tendiente a desaparecer.

# 1 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE DE LÍQUIDOS

Un sistema de transporte es aquel conjunto de equipos y partes mecánicas encargado de dirigir un líquido de un punto a otro a unas condiciones determinadas por el usuario.

Uno de los métodos de uso más generalizado, en cuanto a transporte de líquidos se refiere, lo constituye su conducción a través de tramos de tubería, desde puntos de almacenamiento, hasta puntos de suministro en donde el líquido “se entrega” en determinadas condiciones de presión y caudal (velocidad).

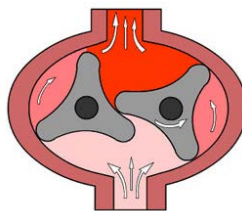
Los sistemas de transporte de líquidos por tuberías, también denominadas redes hidráulicas, están conformados por la integración de 3 subsistemas: subsistema de impulsión, de transporte y de sensado.

## 1.1 SUBSISTEMA DE IMPULSIÓN

También denominados sistema de bombeo, aporta la energía requerida para el transporte del líquido a través de la red. Dependiendo del tipo de fluido, de las características geométricas de la red y de los valores de caudal y presión requeridos en los puntos de suministro, los subsistemas de impulsión pueden estar conformados por arreglos de bombas centrífugas o bombas de desplazamiento positivo.

Las bombas de desplazamiento positivo (Figura 1) envían paquetes de líquido a un flujo constante o variable dependiendo de la configuración de la bomba. Generalmente las bombas de desplazamiento positivo trabajan a presiones elevadas.

Figura 1. Bombas de desplazamiento positivo



Fuente: Sperry Vickers, bombas de desplazamiento positivo. Manual de hidráulica industrial

La presión de trabajo de la bomba será la requerida por el sistema, lo que precisa de válvulas de seguridad y algunos otros aditamentos (Figura 2) que pueden aumentar el costo de la instalación.

Figura 2. Aditamentos de seguridad

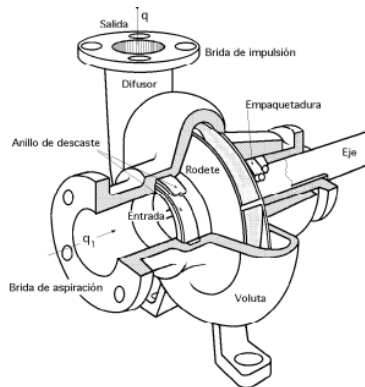


Fuente: Sperry Vickers, válvulas de seguridad. Manual de hidráulica industrial.

### 1.1.1 Bombas Centrífugas

La bomba centrífuga incrementa la energía cinética de un flujo mediante la acción de una fuerza centrífuga, energía que simultáneamente convierte parcialmente en presión, mediante la reducción eficiente de la velocidad del fluido en movimiento.

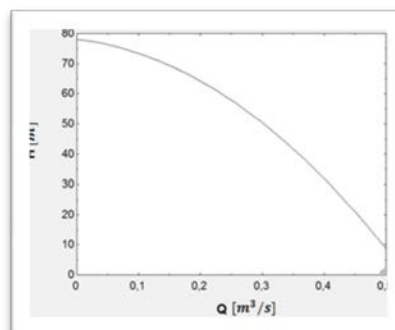
Figura 3. Bomba Centrífuga



Fuente: Pedro Gonzalez Diez, bomba centrífuga. Bombas centrífugas y volumétricas.

En general una bomba centrífuga se caracteriza por tener una curva de operación de la forma  $H = A - BQ - CQ^2$  donde A, B y C son constantes dependientes de la bomba en particular, H la cabeza de presión y Q el caudal. La gráfica de esta curva se muestra en la figura 4, en la cual tanto la presión como el caudal son variables y dependen de la instalación.

Figura 4. Curva de Operación de una Bomba Centrífuga



Fuente: Autores

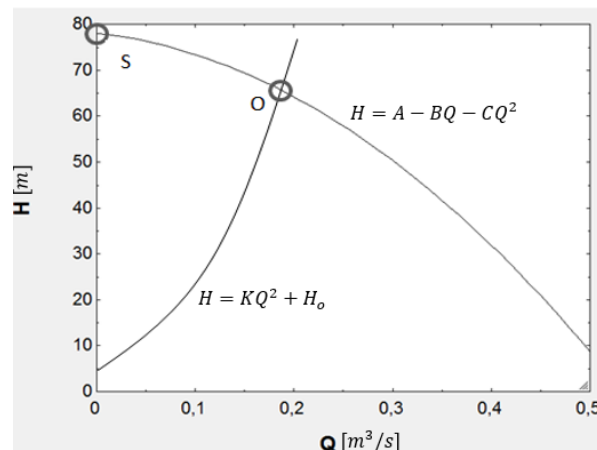
### 1.1.1.1 Punto de Operación y Altura “Shut Off”

Se le llama punto de operación a los valores de caudal y cabeza de presión que desarrolla la bomba acoplada a un sistema de tubería. Una bomba bien seleccionada, en este punto debe satisfacer los requerimientos del sistema.

La curva del sistema de tuberías se ajusta con bastante precisión por la ecuación:

$K$  es una constante de pérdidas,  $H$  es la cabeza de presión requerida por el sistema, y  $Q$  el caudal transportado.  $H_o$  es la cabeza de presión requerida por el sistema a caudal cero. En la figura 5 están representadas la curva de operación de la bomba y la curva de pérdidas de carga del sistema. Se observa el punto de operación (O) y el punto de “Shut Off” (S) que representa la máxima cabeza de presión que genera la bomba, esta situación ocurre cuando se cierra la válvula de impulsión y el fluido queda acumulado antes de la misma.

Figura 5. Punto de Operación y Shut off



Fuente: Autores

Desde el análisis dimensional, se establecen las leyes de semejanza que indican la relación funcional de los parámetros de desempeño de una bomba centrífuga: Caudal, Cabeza de presión y potencia; con la velocidad de rotación, y el diámetro del Rotor. La

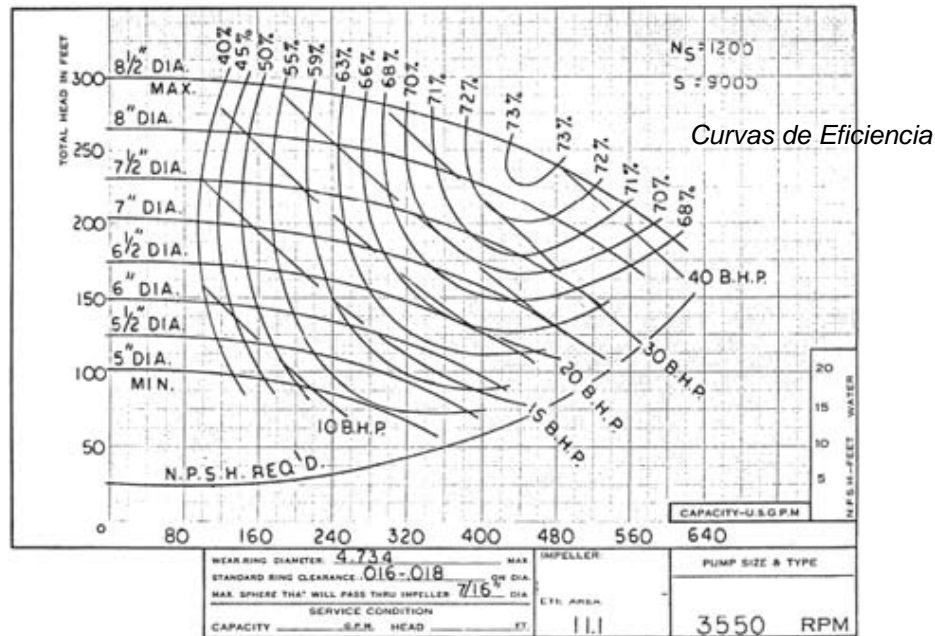
siguiente tabla muestra esta dependencia y la figura 6 representa la familia de curvas que caracterizan el desempeño de una bomba a diferentes rpm y diámetros.

Tabla 1. Leyes de semejanza de bombas

$\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^2$	$\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^3$	$\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]$	$\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right] * \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^3$
$\frac{H_2}{H_1} = \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^2$	$\frac{H_2}{H_1} = \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^2$	$\frac{H_2}{H_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]^2$	$\frac{H_2}{H_1} = \left[\frac{N_2}{N_1} * \frac{D_2}{D_1}\right]^2$
$\frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^4$	$\frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^5$	$\frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]^3$	$\frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \left[\frac{N_2}{N_1}\right]^3 * \left[\frac{D_2}{D_1}\right]^5$
▲ <b>RPM = cte</b> <b>Rodete recortado</b>	▲ <b>RPM = cte</b> <b>Otros Rodete</b>	▲ <b>RPM diferente</b> <b>Igual rodete</b>	▲ <b>RPM diferente</b> <b>Otros rodete</b>

Fuente: Autores

Figura 6. Curvas de una Bomba Centrífuga



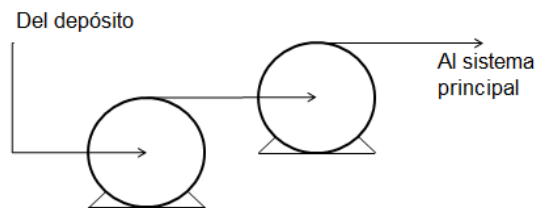
Fuente: Seleccionando una bomba centrífuga eficiente. Imagen tomada de <http://todoproduktividad.blogspot.com/2011/01/seleccionando-una-bomba-centrifuga.html>

### 1.1.1.2 Configuración de un Grupo de Bombas

En las instalaciones de bombeo constituidas por más de una bomba, estas pueden estar acopladas en serie o paralelo.

En la configuración de acoplamiento en serie, cada bomba descarga su flujo en la succión de la siguiente bomba como se ve en la figura 7.

Figura 7. Configuración en serie

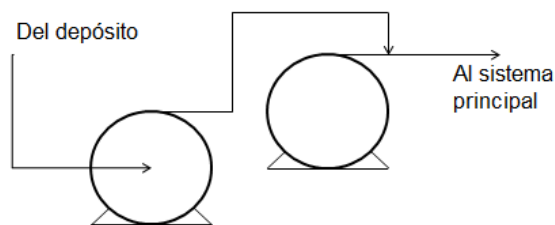


Fuente: Los Autores

En una configuración en serie, cada bomba impulsa el mismo caudal, y la cabeza de presión resultante para el sistema es la equivalente a la suma de las cabezas de presión aportadas por cada bomba.

En el caso de la configuración en paralelo, las bombas descargan en conjunto al sistema como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Configuración en paralelo



Fuente: Autores

Con las bombas trabajando en paralelo, el flujo que se descarga al sistema equivale a la suma de los flujos que provienen de cada bomba y todas las bombas desarrollan

igual cabeza de presión, cuyo valor equivale a la cabeza de presión resultante para el sistema.

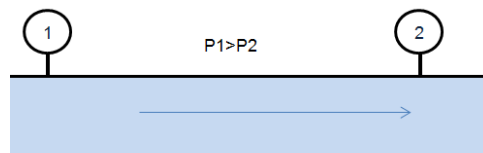
## 1.2 SUBSISTEMA DE TRANSPORTE

Se define como la parte del sistema encargada de manejar y transportar el fluido de un sitio a otro. Comprende los tramos de tubería, válvulas y accesorios requeridos para el fin mencionado.

### 1.2.1 Tuberías y Pérdidas de Carga

Así como un cuerpo sólido presenta fricción con el suelo que lo sostiene, o las llantas de un automóvil experimentan fricción con el pavimento, los líquidos también presentan un fenómeno conocido como pérdida de carga. La pérdida de carga se explica como la energía perdida por un fluido a raíz de la fricción o contacto con la tubería que lo conduce; este fenómeno se puede observar en la realidad al verificarse que la presión a la entrada de un tramo de tubería, es mayor que la presión que se registra “aguas abajo” a la salida, como lo explica la figura 9.

Figura 9. Pérdida de Carga



Fuente: Autores

La pérdida de presión depende de factores como la viscosidad y densidad del fluido, la velocidad del flujo, la temperatura de operación, el material y la rugosidad de las superficies internas de la tubería, su diámetro, entre otros.

El primer paso en el cálculo de las pérdidas de carga, es la determinación del número de Reynolds<sup>1</sup> (Re). El número de Reynolds es un parámetro adimensional que

---

<sup>1</sup> Osborne Reynolds, ingeniero y físico irlandés que realizó importantes contribuciones en los campos de la hidrodinámica y la dinámica de fluidos.

relaciona la velocidad de flujo, su viscosidad y el diámetro de la tubería por la que se está transportando.

—

Dónde:

Vs: Velocidad de flujo

D: Diámetro de la tubería

V: Viscosidad cinemática del fluido.

El régimen laminar, se presenta en la práctica industrial, en aplicaciones de flujos de líquidos altamente viscosos, y se modela exclusivamente por la fórmula de Darcy<sup>1</sup>:

—

En régimen turbulento, para el cálculo de la cabeza energética perdida, se utiliza la fórmula Darcy-Weisbach<sup>2</sup>, que resulta de un balance de cantidad de movimiento dimensionalmente correcto:

— —

Dónde:

Hf: Altura de carga pérdida (en unidades de longitud)

F: Factor adimensional de fricción de Darcy. Depende del material de la tubería y del número de Reynolds.

L: Longitud de la tubería

D: Diámetro de la tubería

---

<sup>1</sup> Henry Philibert Gaspard Darcy, hidráulico francés conocido como uno de los pioneros en el abastecimiento de agua potable.

<sup>2</sup> Julius Ludwig Weisbach, matemático e ingeniero alemán.

V: Velocidad de flujo

G: Aceleración de la gravedad

El coeficiente de fricción de Darcy se calcula mediante la ecuación de Colebrook-White, que resulta del ajuste de los datos experimentales de Nikuradse<sup>1</sup>:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[ \frac{k}{3.7D} + \frac{5.74}{Re \sqrt{f}} \right]$$

La letra k se usa más para constantes de proporcionalidad, (ya se utilizó en la ecuación de pérdidas del sistema)

La relación  $e/D$  representa la rugosidad relativa del material de la superficie interna de la tubería.

El uso de la ecuación de Colebrook-White presenta una dificultad numérica al no quedar explícito el valor de f, condición que requiere de un proceso iterativo para su despeje. Se consigue una convergencia rápida iniciando el proceso de cálculo con ecuaciones aproximadas explícitas entre las que destaca la de Barr:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[ \frac{k}{3.7D} + \frac{5.74}{Re} \right]$$

La importancia de cuantificar las pérdidas de carga en las líneas presurizadas, que se evidencia en los numerosos estudios realizados sobre el tema, radica en el hecho de que las pérdidas de carga determinan la capacidad energética requerida en los sistemas de bombeo, y su consumo eléctrico. Estos parámetros se verán reflejados en los costos de inversión y operativos de un proyecto de transporte de líquidos.

### 1.2.2 Válvulas y Accesorios

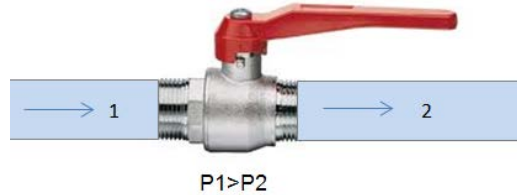
Al igual que las tuberías, los accesorios como codos, T's, boquillas, válvulas, etc., presentan una resistencia al flujo, que acarrea una disminución en el nivel energético.

---

<sup>1</sup> Johann Nikuradse, ingeniero y físico alemán.

Esta disminución de energía se traduce en una pérdida de presión del flujo que pasa a través de un accesorio como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Pérdida por Accesorio

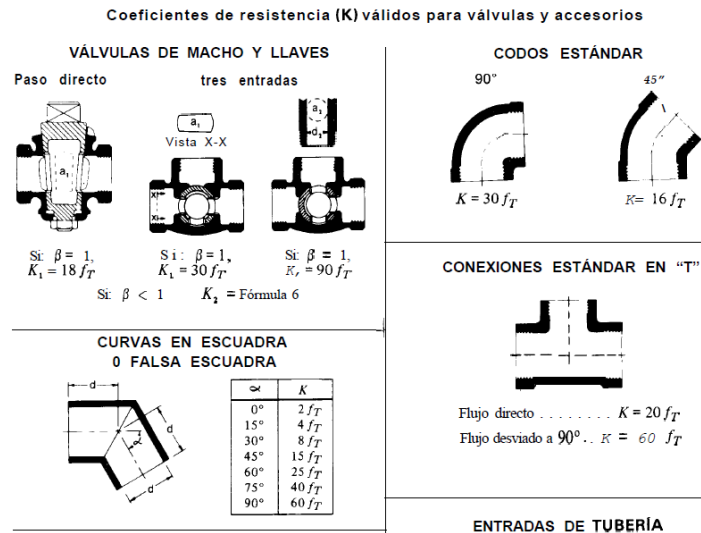


Fuente: Autores

Para las distintas clases de válvulas y accesorios, se han realizado múltiples trabajos experimentales de cuantificación de la altura de pérdidas  $H_L$  en términos del producto de una constante empírica  $K_{\text{acces}}$ , y la cabeza de velocidad en tubo:

En el manual de Flujo de Fluidos de Crane se especifican los valores de la constante  $K_{\text{acces}}$ . Un ejemplo se muestra en la figura xyz.

Figura 11. Coeficientes K de pérdidas en accesorios



Fuente: Flujo de Fluidos. Crane

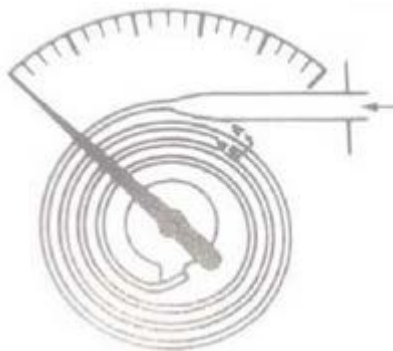
### 1.3 SUBSISTEMA DE SENSADO

En un sistema de transporte de líquidos existen muchas variables a controlar y a observar, por ejemplo, se desea que en algún sistema la presión no pase de cierto punto, en ese caso deberá existir un manómetro que indique qué presión existe en dicho punto para que, en caso de que la presión aumente, se emita una alarma que realice cierta acción. En general el subsistema de sensado se encarga de medir las variables importantes del sistema, cuyos valores determinarán acciones a tomar, si es un sistema automatizado, un controlador ordenará la ejecución de dicha opción, en caso contrario, se debe contar con operarios para la manipulación de los equipos.

#### 1.3.1 Transmisores de Presión y Manómetros

Un manómetro es un instrumento utilizado para medir la presión en un punto específico de interés. En general constan de un tubo metálico enrollado llamado tubo de Bourdon, el cual se desplaza cierta longitud al aumentar la presión dentro de sí como se observa en la figura 12. La presión es una variable importante y se debe prestar especial atención a dicho valor pues un valor muy alto de presión puede causar que algunos componentes fallen provocando un fallo general del sistema y en algunos casos, serios problemas de seguridad.

Figura 12. Tubo de Bourdon1



Fuente: Los Autores

Un transmisor de presión es, en pocas palabras, un manómetro que envía una señal eléctrica de corriente o voltaje en función de la presión medida. Una descripción más detallada de esta clase de dispositivos se da en el capítulo 2.

### 1.3.2 Fluómetros

Un flujómetro (o caudalímetro) es un equipo que, como su nombre lo indica, se usa para medir el caudal que pasa por cierta parte de un circuito hidráulico. Existen diversos tipos de flujómetros cada uno con un principio de funcionamiento particular. El mostrado en la figura 13 es llamado flujómetro de turbina.

Figura 13. Fluómetro de Turbina



Fuente: Los Autores

La importancia del uso de un flujómetro radica principalmente en cuantificar el fluido del que se puede disponer en cierto tiempo, un flujómetro indica cuanto volumen se transporta en cierto tiempo y algunos tienen la opción de registrar todo el volumen transportado, lo cual genera muchos beneficios en industrias petroleras, acueductos, termoeléctricas, entre otras.

Además de los equipos mencionados, pueden existir otros instrumentos como medidores de humedad, de vibraciones en tuberías, etc., que pueden requerirse para alguna aplicación en particular y podrían incluirse en esta subdivisión del sistema.

## 1.4 REGULACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSPORTE DE LÍQUIDOS

En un sistema de transporte de líquidos dinámico en el que la demanda cambia a lo largo del día se hace indispensable la implementación de una regulación de líquido, la cual debe estar preparada para afrontar cualquier demanda de flujo satisfaciendo las necesidades de presión del sistema.

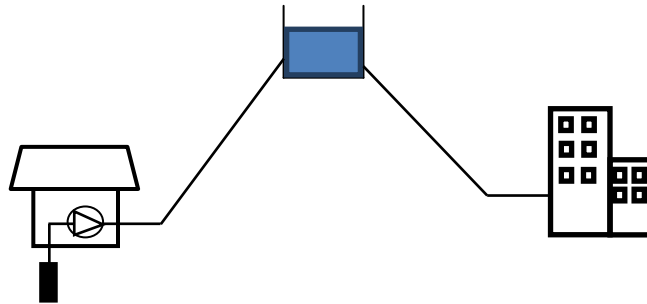
Con frecuencia esa regulación representa una disminución en el rendimiento del sistema, para mitigar los efectos de la regulación se debe escoger entre los tipos de regulación posibles el que mejor se adapte a la configuración que se tiene. A continuación se presentan los tipos de regulación más usados.

- Implementar depósitos en los que se almacene fluido de reserva
- Regulación por arranque o parada
- Utilizar válvulas de regulación manuales o automáticas
- Utilizar variador de velocidad de giro del motor de la bomba

### 1.4.1 Depósitos de Reserva

La necesidad de regulación viene de mucho tiempo atrás y es por esto que se dispone de opciones de regulación no tan modernos y tecnológicos, pero que en determinadas ocasiones son suficientes para satisfacer las necesidades de regulación; ese es el caso de usar depósitos de reserva a los cuales se bombea el líquido constantemente y este almacena o suministra el mismo según sean las necesidades del sistema. Este tipo de regulación con frecuencia es implementado para proveer agua a poblaciones o zonas urbanas donde la demanda de líquido fluctúa a lo largo del día; dichas fluctuaciones se pueden determinar haciendo un estudio de la demanda a lo largo del día, y haciendo uso de modelos estadísticos determinar las dimensiones de los depósitos de reserva así como el nivel mínimo que estos deben tener.

Figura 14. Regulación mediante depósito de suministro

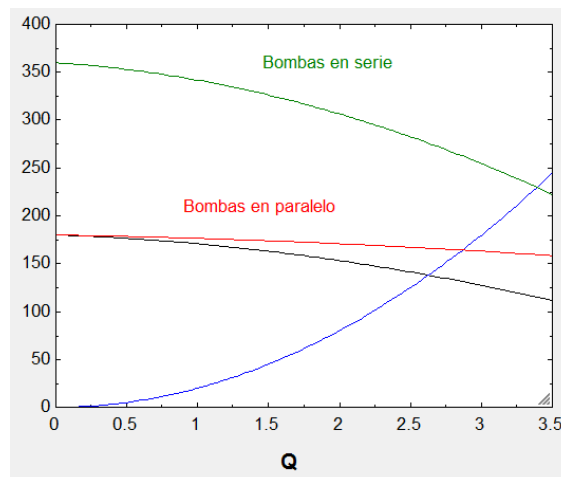


Fuente. Autores

#### 1.4.2 Arranque o Parada de Bombas

En ocasiones en las que la implementación de depósitos no sea suficiente para el sistema de regulación y además se cuente con la disponibilidad de varias bombas adaptadas en serie o paralelo; la solución de regulación se reduciría a utilizar las bombas en serie, paralelo, o trabajar con una sola.

Figura 13. Efectos acople Bombas Serie – Paralelo



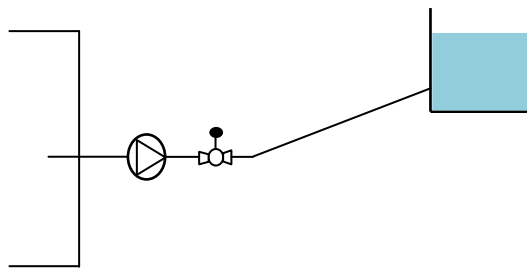
Fuente. Autores

Cabe resaltar que cuando se decide regular con arranque o parada de bombas se debe disponer de circuitos automáticos que dependiendo la demanda acoplen o desacoplen el funcionamiento de las bombas; así como prever cuales son las condiciones que requieren dicho acoplamiento.

### 1.4.3 Válvulas de Regulación

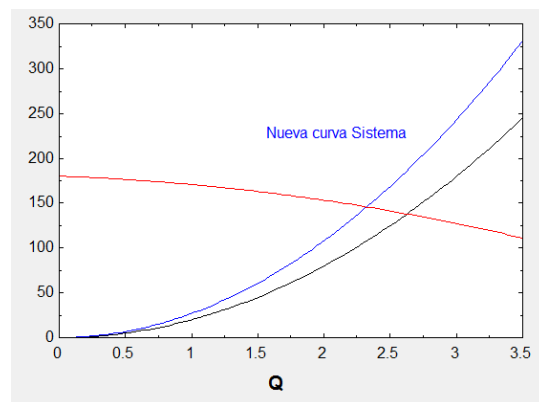
Otro tipo de regulación con frecuencia implementado por el bajo costo que representa es adaptar una válvula de regulación en la descarga de las bombas instalada en serie o derivación. Aunque sea una medida sencilla de implementar y de bajo costo se debe tener en cuenta que instalar una válvula al sistema representa una caída de presión y por consiguiente una disminución del rendimiento del sistema.

Figura 15. Uso válvula de regulación



Fuente. Autores

Figura 16. Efecto producido por la Válvula en la Curva del Sistema

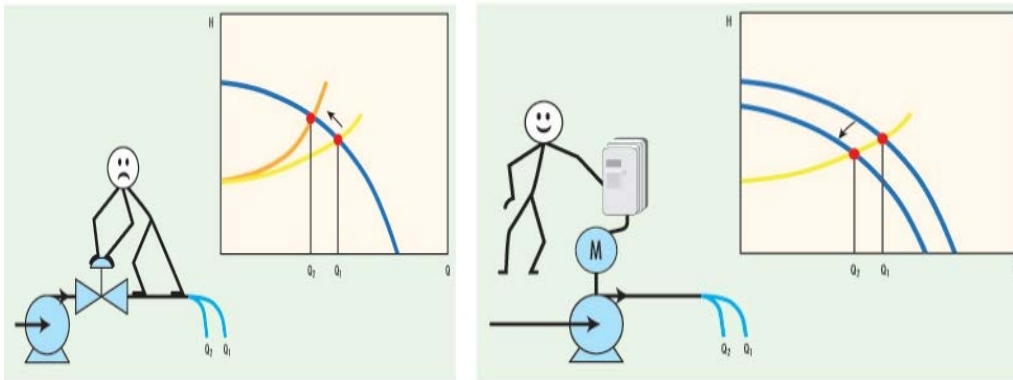


Fuente. Autores

#### 1.4.4 Variación de Velocidad de Giro de las Bombas

Sin lugar a duda la variación de la velocidad de giro de la bomba representa la medida más eficiente para un sistema. Este método consiste en hacer pasar la curva de la bomba por el punto de la curva del sistema correspondiente al caudal solicitado.

Figura 17. Regulación con Variador Vs Regulación con Válvula



Fuente: Allan R. Budris, *Selecting the Best/Most Efficient Centrifugal Pump Control*

Aunque sea una tentación escoger este método de regulación por ser el que mejor rendimiento representa, no se debe pasar por alto el costo de inversión elevado que éste implica. La gran ventaja de la regulación de velocidad frente a utilizar válvulas se hace evidente cuando se va a trabajar fuera del punto de diseño.

## **2 MARCO TEÓRICO CONTROL**

### **2.1 NORMAS, SIMBOLOGÍA Y ESTÁNDARES**

En control e instrumentación se han creado una serie de normas que faciliten la estandarización de símbolos de instrumentación que hagan más fácil la interpretación y traspaso de información.

El Instituto Nacional Estadounidense de Estándares y La Sociedad Internacional de automatización son entes reconocidos encargados de establecer un lenguaje de comunicación para la automatización de procesos; estándares que se encuentran en continua actualización y mejora. Para el caso competente actual se habla de las normas ANSI/ISA 5.1-1984(R1992) e ANSI/ISA 5.2-1976 (R1992). En la primera de estas se encuentra la información con respecto a los símbolos de instrumentación e identificación y en la segunda se encuentra la información con respecto a lógica binaria para arranque de equipos, operación y parada de equipos que facilite la comunicación entre el personal involucrado con el sistema.

Las normas se pueden usar para aplicaciones en la industria química, petrolera, eléctrica, aire acondicionado y otros procesos industriales, el hecho de que las normas aquí mencionadas sean versátiles por la cantidad de campos en los que pueden ser implementadas la hace poco específica y aterrizada, labor que debe ser desarrollada por el encargado de la instrumentación.

### **2.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MONITOREO**

Los sistemas de monitoreo son aplicaciones de software pensado para proveer labores de supervisión de procesos, lo que representa la cima en un proceso de automatización.

El sistema de monitoreo proporciona la comunicación con dispositivos de campo encargados de la adquisición de datos y envía la información obtenida a otros usuarios, información suministrada de forma gráfica en tiempo real; además dentro de las funciones del mismo también se puede encontrar el ejercer acciones sobre los

dispositivos en campo ya sea para hacer cambios de operación o correcciones cuando se presenten fallas.

Dentro de las funciones principales del sistema de monitoreo se encuentran dar información en cuanto a desempeño de instalaciones y equipos con históricos de fallos y paradas que faciliten labores de mantenimiento.

Un sistema de monitoreo está conformado por elementos que poseen Hardware y Software los cuales se clasifican en cinco niveles:

- Nivel de Instrumentación

En este nivel se capta la variable física y se convierte a señal eléctrica por lo general de 4 – 20 [mA] o 0-10 [V].

- Nivel de RTU's

En este nivel se encuentra La Unidad Terminal Remota; encargada de captar y procesar la información tomada en el nivel de instrumentación

- Nivel de Comunicaciones

Este nivel es el encargado de tomar la información procesada por la RTU y llevarla al centro de control por el medio seleccionado.

- Centro de Control

En el centro de control se encarga del procesamiento de las señales

- Interfaz Hombre – Máquina (HMI)

Elemento de dominio grafico que permite la interacción del operario con los elementos del sistema de control.

### 3 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DISPONIBLES EN EL BANCO

#### 3.1 PLC SIEMENS<sup>1</sup> S7-1200

Es un controlador lógico programable (PLC) modular a través del cual se pueden ejecutar tareas y labores de automatización en las cuales normalmente se requeriría un operario o alguna clase de complejo sistema mecánico. Básicamente consta de hardware y software; el hardware a su vez (Figura 18), consta de una fuente de alimentación (1) y una CPU (2), en la cual se vigilan todos los procesos, se almacenan las variables y se llevan a cabo operaciones específicas determinadas por el usuario. El software encargado del control, la programación de las variables y las acciones, se llama STEP 7, el cual se programa desde un computador. Luego de realizar la programación en el software, se debe descargar el programa de usuario a la CPU del PLC, en ese momento, el PLC podrá trabajar sin el computador.

Cabe resaltar que, al ser un dispositivo modular, se tiene la opción de incorporar diferentes módulos a su derecha si se requiere (3). Por ejemplo, para el desarrollo de este proyecto, se requirió de un módulo de entradas y salidas análogas pues las que tiene disponibles la CPU por defecto, no eran suficientes.

Figura 18. PLC S7-1200



Fuente: Los Autores

##### 3.1.1 Funciones del PLC

<sup>1</sup> Multinacional de origen alemán dedicada a las telecomunicaciones.

Como elemento controlador, el PLC deberá ser el encargado de cumplir las siguientes tareas:

- Adquisición de las diferentes señales provenientes de los elementos sensores (transmisores de presión y flujómetro) para su posterior análisis con la ayuda de la comunicación con el software LABVIEW.

La información acerca de este dispositivo se irá ampliando a través del desarrollo de este trabajo.

### 3.2 VARIADOR DE FRECUENCIA

Un variador de frecuencia se usa comúnmente cuando se desea efectuar un ahorro energético preciso en sistemas de refrigeración, transportadores, bombas, ventiladores etc. Como su nombre lo indica, se encarga de regular la frecuencia del voltaje que llega al motor con el fin de regular las revoluciones por minuto del mismo aunque a manera de complemento, dichos variadores incluyen protecciones especiales contra sobrecargas, picos indeseados etc., además de presentar un ahorro en cuanto a aditamentos especiales de arranque de motor y otros importantes a la hora de manipular corriente alterna.

El variador con el que cuenta el banco es un Siemens G110 (Figura 19) para motor de 1 [HP] de potencia el cual permite un rango de frecuencia de salida de 0 a 650 [Hz], es alimentado con voltaje de 220 VAC\* a una frecuencia de 47 a 63 [Hz] y es controlado a través de una entrada de señal análoga. Más información sobre el montaje y conexión se puede ver en el capítulo 4 (descripción y montaje general)

Figura 19. Variador de frecuencia Siemens G110



Fuente: Catálogo Siemens

---

\* Voltaje de corriente alterna, por sus siglas en inglés

### 3.2.1 Funciones del Variador de Frecuencia

- Variar las rpm del motor cambiando así el flujo que pasa por el sistema.
- Proteger el motor trifásico.

El variador de frecuencia es un actuador que, en el desarrollo de este proyecto, cumple la función de variar la curva de la bomba en la cual está ubicado para así poder visualizar mejor el desempeño de la misma y el punto óptimo en el cual el sistema trabaja a una mayor eficiencia.

### 3.3 BOMBAS

El banco cuenta con dos bombas centrífugas encargadas de enviar el flujo a través del sistema. Para efectos de instalación del variador de frecuencia, uno de los motores es trifásico y el otro es monofásico, siendo el trifásico el objeto al cual se le varía la velocidad. Los datos característicos de las dos bombas centrífugas se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Datos característicos bombas

	BOMBA 1	BOMBA2
MARCA	Siemens*	Ecojet
POTENCIA [HP]	1	1
RPM	3600	3600
FASES	3	1
* La marca del motor es Siemens y la del impulsor Ecojet.		

Fuente: Autores

La bomba Ecojet<sup>1</sup> (Figura 20) es importante a la hora de visualizar el comportamiento del sistema operando las dos bombas en serie o paralelo, punto en el cual se trabajaría en conjunto con la bomba variable Siemens.

Figura 20. Bomba Ecojet



Fuente: Autores

---

<sup>1</sup> Modelo de leader pumps, empresa italiana fabricante de bombas

### 3.3.1 Funciones del Grupo de Bombas

- Impulsar el fluido de trabajo (agua) para lograr que pase a través de toda la red de tubería activada.
- Variar el flujo (bomba Siemens) para realizar la comparación de los dos diferentes métodos de regulación.
- Permitir la inspección y visualización de los cambios en las curvas características de las mismas.

...La conexión de las bombas, así como el ensamble de la bomba Siemens se describe más detalladamente en el capítulo 4...

### 3.4 TRANSMISORES DE PRESIÓN

El banco cuenta con 3 diferentes transmisores encargados de medir la presión, dos de ellos en algún punto del sistema y el tercero (diferencial) la diferencia de presión presente en dos puntos del sistema (descarga y retorno).

Los tres transmisores son marca Siemens serie SITRANS P, los cuales tienen una salida de señal de 4-20mA con un voltaje de alimentación de 12-30 VDC.

#### 3.4.1 Transmisores de Succión y Descarga

El transmisor de succión (Figura 21) es el encargado de medir la presión a la entrada de la configuración de bombas, el rango de medición de éste es de 0 a 1 bar. Por otro lado, el transmisor de descarga (Figura 22) se ocupa de medir la presión en la línea de impulsión y el rango de medición de éste es de 0 a 10 bar.

Figura 21. Transmisor de succión



Fuente: Los Autores

Figura 22. Transmisor de descarga



Fuente: Los Autores

### 3.4.2 Transmisor Diferencial

Este equipo está dispuesto para medir la diferencia de presión en la tubería activada entre la descarga de las bombas y el retorno del fluido a tanque, es esencial a la hora de calcular pérdidas en el sistema, cuenta con dos puertos en los cuales penetra el fluido a la presión del punto en cuestión, permitiendo al transmisor mostrar la diferencia en estas presiones en bar o su equivalencia en mA.

Para los tres equipos descritos se encuentra una ecuación característica mediante la cual, a partir de la medida de corriente que estos muestran, se puede deducir la presión equivalente. Esta ecuación es descrita a continuación:

---

Dónde:

I: Corriente de salida en mA

P: Presión existente

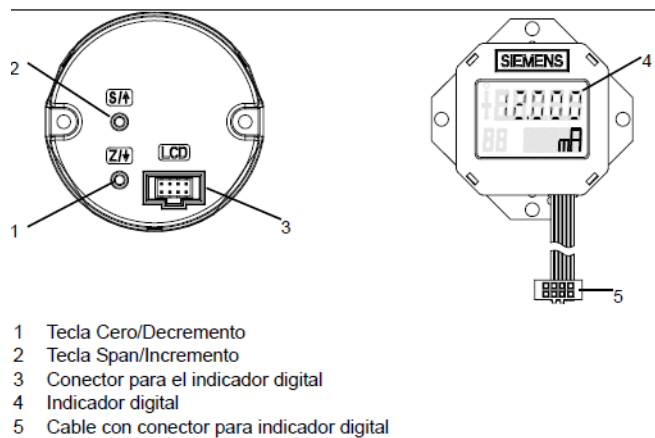
FM: Final del margen de medida, representa la presión a la cual el transmisor marca una corriente de 20mA.

PM: Principio del margen de medida, es la presión a la cual el transmisor indica 4mA.

En los transmisores presentes en el banco, el valor FM y PM son modificables con el fin de particularizarlos al proceso que se está llevando a cabo, evitando así pérdida de medidas útiles y rangos inútiles de señales que jamás llegarán a verse. Para modificar estos valores, se debe seguir el procedimiento mostrado a continuación:

- Retirar la tapa delantera del transmisor e identificar los botones mostrados en la figura 23

Figura 23. Ubicación del teclado



Fuente: Teclado frontal, catálogo SITRANS P Siemens

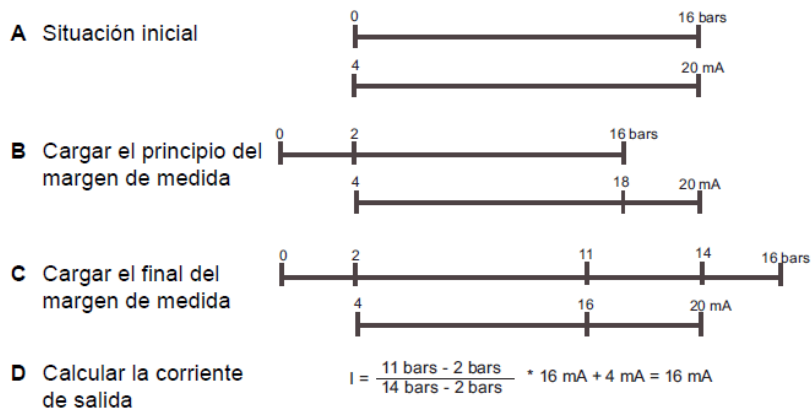
- Ajustar los márgenes de medida de acuerdo a la tabla 3.
- Un ejemplo de este procedimiento se muestra en la figura 24. Para este ejemplo, el margen de medida del transmisor es de 0 a 16 bar y se desea uno de 2 a 14 bar.

Tabla 3. Funciones manejo mediante teclas

Manejo mediante las teclas	Aclaraciones
Mantener pulsadas [Z/↓] y [S/↑] 5 s.	Anular el bloqueo de teclado y la protección de escritura.
Mantener pulsada [Z/↓] 2 s.	<b>Cargar</b> el principio del margen de medida a la presión existente y memorizar.
Mantener pulsada [S/↑] 2 s.	<b>Cargar</b> el final del margen de medida a la presión existente y memorizar.
Pulsar [Z/↓] mantener pulsada e inmediatamente pulsar [S/↑], soltar las dos teclas.	Activar la función " <b>Ajustar</b> el principio del margen de medida".
Pulsar [S/↑] mantener pulsada e inmediatamente pulsar [Z/↓] soltar las dos teclas.	Activar la función " <b>Ajustar</b> el final del margen de medida".
[Z/↓] decrementando o [S/↑] incrementando.	<b>Ajustar</b> el principio o final del margen de medida. Pulsando una tecla permanentemente se activa una dinámica de ajuste y el proceso se acelera.
Mantener pulsadas [Z/↓] y [S/↑] 2 s.	Memorizar el principio o el final del margen de medida ajustados.

Fuente: Manejo mediante teclas, catálogo SITRANS P Siemens

Figura 24. Carga margen de medida

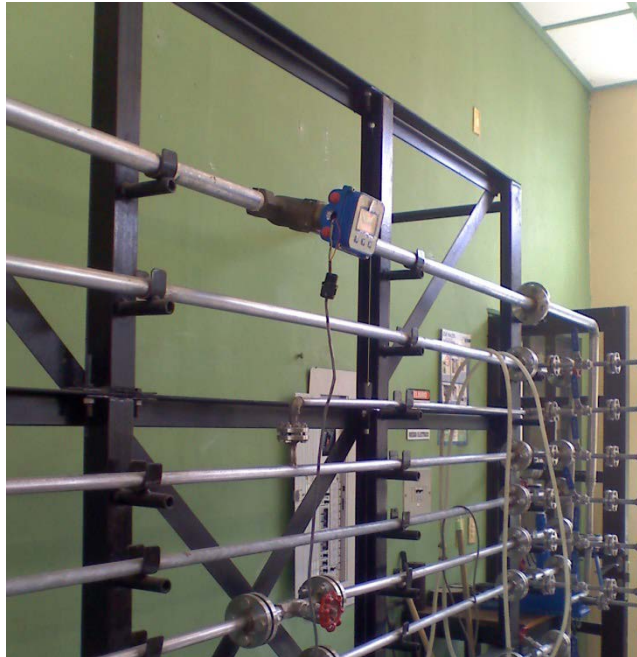


Fuente: Carga del margen de medida, catálogo SITRANS P, Siemens.

### 3.5 TUBERÍAS Y VÁLVULAS

El banco cuenta con una red de tuberías y válvulas (Figura 25), todas éstas manuales, con las cuales se deshabilitaban algunas vías con el fin de estudiar el fenómeno de pérdidas de carga.

Figura 25. Red de tuberías y válvulas

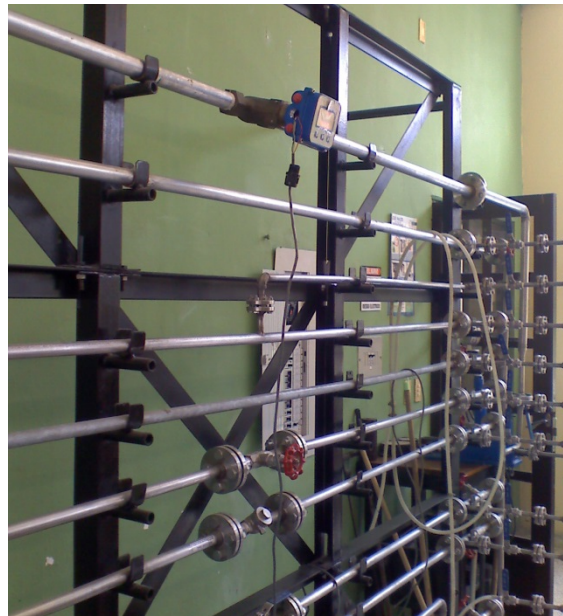


Fuente: Autores

Como es de conocimiento general, la tubería es la encargada de contener el líquido que se va a transportar, pero ésta también es la encargada de producir la pérdida de carga del fluido, lo cual dispone la bomba o el grupo de bombas a trabajar a ciertas condiciones, también objeto de análisis en este trabajo.

Para un mayor campo de análisis, la red de tubería cuenta con tubos de distintos diámetros y cédulas, los cuales son mostrados en las figuras 26 y 27.

Figura 26. Red de tuberías



Fuente: Autores

Figura 27. Detalle tubería



Fuente: Autores

Para efectos de medición, algunos tramos de la red están disponibles para la adaptación de una manguera exterior para conexión al transmisor de presión, el flujo es medido por el flujómetro montado en la línea de retorno a tanque, por lo cual su

desconexión del sistema no es permitida si no se desacopla completamente el tramo entre bridas.

### 3.6 FLUJÓMETRO

El dispositivo para medición de flujo presente en el banco (Figura 28) es un flujómetro de turbina Seametrics<sup>1</sup> FT420, el cual se alimenta en un rango de 12-30 VDC y arroja una señal de salida en corriente de 4-20mA.

Figura 28. Flujómetro



Fuente: Autores

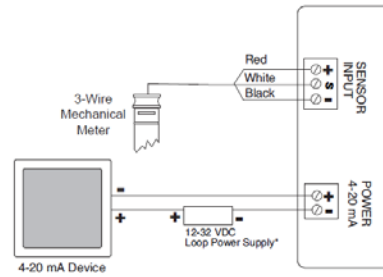
#### 3.6.1 Conexión

Este dispositivo tiene la opción de conectar con salida de señal o sin salida, usando el display del mismo, cuando se trabaja con salida de señal, el display permanece apagado. La figuras 29 y 30 muestran la conexión con salida de señal y sin salida de señal respectivamente.

Figura 29. Flujómetro con salida de señal

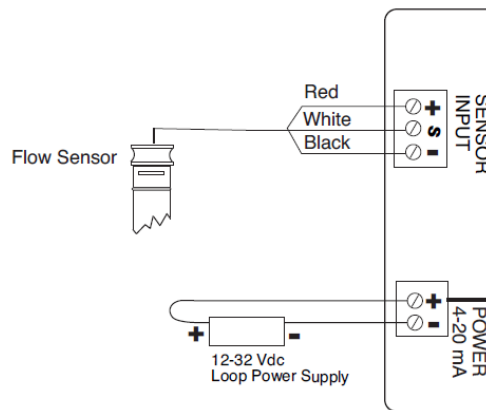
---

<sup>1</sup> Empresa dedicada al suministro de equipos para medición y control de flujo.



Fuente: Conexión a un dispositivo 420 mA, Manual Seametrics

Figura 30. Flujómetro sin salida de señal



Fuente: Conexión directa, Manual Seametrics

### 3.6.2 Configuración

Para la adaptación del equipo al campo en el que se va a usar, el flujómetro tiene la opción de cambiar las unidades en las que muestra el flujo, así como una configuración del punto de máxima medida, con la cual se ajusta el flujo al cual la salida de señal será 20mA, sabiendo que siempre marcará 4mA con un flujo de 0.

Imágenes específicas y un procedimiento completo dado por el fabricante para la configuración del equipo es mostrado en el anexo D.

## 4 DESCRIPCIÓN Y MONTAJE GENERAL

Teniendo en cuenta que los equipos a trabajar en el banco deben cumplir procedimientos y normas para su montaje e instalación, se procedió a seleccionar la caja de control, así como contactores, relés y demás elementos que servirán para protección del usuario y los equipos en sí.

### 4.1 ADECUACIÓN DEL TABLERO DE CONTROL

La tabla 4 describe los equipos con los que cuenta el banco así como su descripción técnica.

Tabla 4. Descripción técnica equipos

EQUIPO	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]
Bomba centrífuga monofásica	110	13
Bomba centrífuga trifásica	220	12
Variador de frecuencia	220	10
Transmisor de succión	12 a 30	0.0125
Transmisor de descarga	12 a 30	0.0125
Transmisor diferencial	12 a 30	0.0125
Flujómetro	12 a 30	0.004 a 0.020

Fuente: Autores

Las figuras 31 y 32 muestran los diagramas de control y potencia usados para la instalación de los componentes en el tablero, en ella se observa los dos niveles de voltaje manejados, 220 (conexiones rojas) y 110 VAC (conexiones rojas con neutro gris). Los dispositivos de protección, así como el tipo de cable y otros elementos se seleccionaron con la asesoría de técnicos electricistas de la división de mantenimiento de la Universidad Industrial de Santander.



La figura 33 muestra la disposición final del tablero de control.

Figura 33. Disposición final tablero de control



Fuente: Autores

## 4.2 CONEXIÓN MOTOR-VARIADOR DE FRECUENCIA

La conexión del motor trifásico con el variador de frecuencia se debe realizar como lo muestra la figura 34.

Figura 34. Conexión motor trifásico-variador



Fuente: Autores

En el momento en el que se active el contactor correspondiente al variador de frecuencia, éste se energizará. En ese momento el usuario debe configurar el variador para el motor presente en el banco. La marcha del motor empezará cuando el usuario oprima el botón verde del variador, se detendrá cuando oprima el botón rojo y cambiará de sentido cuando oprima el botón de cambio de giro (flechas). Se ajusta la frecuencia de giro del motor a través de las teclas arriba y abajo.

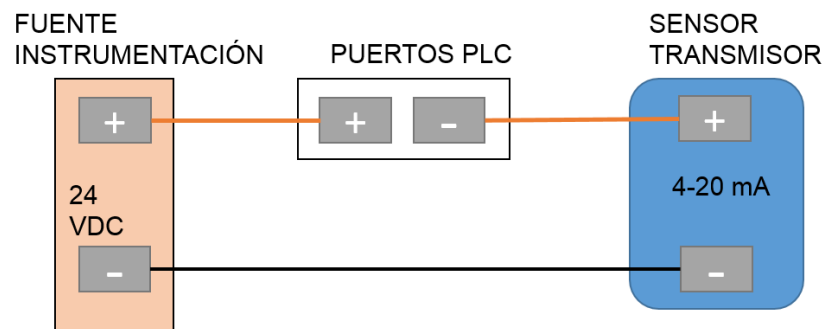
El procedimiento para configurar el variador con el motor se presenta en el anexo E.

### 4.3 CONEXIÓN INSTRUMENTACIÓN-PLC

**Nota:** todos los puertos de entrada analógica del PLC deben estar configurados para la medición de corriente, esto se configura a través del software del PLC, STEP 7.

Los puertos del PLC funcionarán como si estos fueran una serie de amperímetros, de manera que la instrumentación debe conectarse en serie “energizado en bucle” o “loop powered” para la medición de la señal 4-20 mA indicando esto que como todos los instrumentos poseen esta salida de señal, todos se deben conectar exactamente igual, tal como lo ilustra la figura .

Figura 35. Conexión instrumentación-PLC



Fuente: Autores

## 5 ADQUISICIÓN DE SEÑALES

### 5.1 LEVANTAMIENTO DE SEÑALES

- **Caudal de descarga:**

Unidad de medida: GPM; Rango: 0 – 42.2 GPM

- **Caudal de retorno:**

Unidad de medida: GPM; Rango: 0 – 42.2 GPM

Instrumento de medición: Flujómetro de turbina en línea con Display. Rango 0.8 – 80 GPM Alimentación 6 -24 VDC, (8mA), Salida de 4 – 20 mA

- **Presión succión:**

Unidad de medida: Bar; Rango: 0.03021 – 0.16056 Bar

Instrumento de medición: Manómetro siemens SITRANS P – MS Series. Rango 0 -1 Bar salida de 4 – 20 mA, HART Alimentación 10 a 45 VDC

- **Presión descarga:**

Unidad de medida: Bar; Rango: 0 -10 Bar

Instrumento de medición: manómetro siemens SITRANS P – MS Series. Rango 0 – 10 Bar con salida de 4- 20 mA, HART; Alimentación de 12 – 40 VDC

- **Presión diferencial:**

Unidad de medida: Bar; Rango: 0 -5 Bar

Instrumento de medición: manómetro diferencial siemens sitrans P – DS III Series. Rango 0 – 5 Bar con salida 4- 20 mA, HART; Alimentación de 10 a 45 VDC

- **Motor:**

Unidad de medida: Potencia eléctrica; Rango: 0 – 1.25 KW

Instrumento de medición: Pinza voltiamperimétrica.

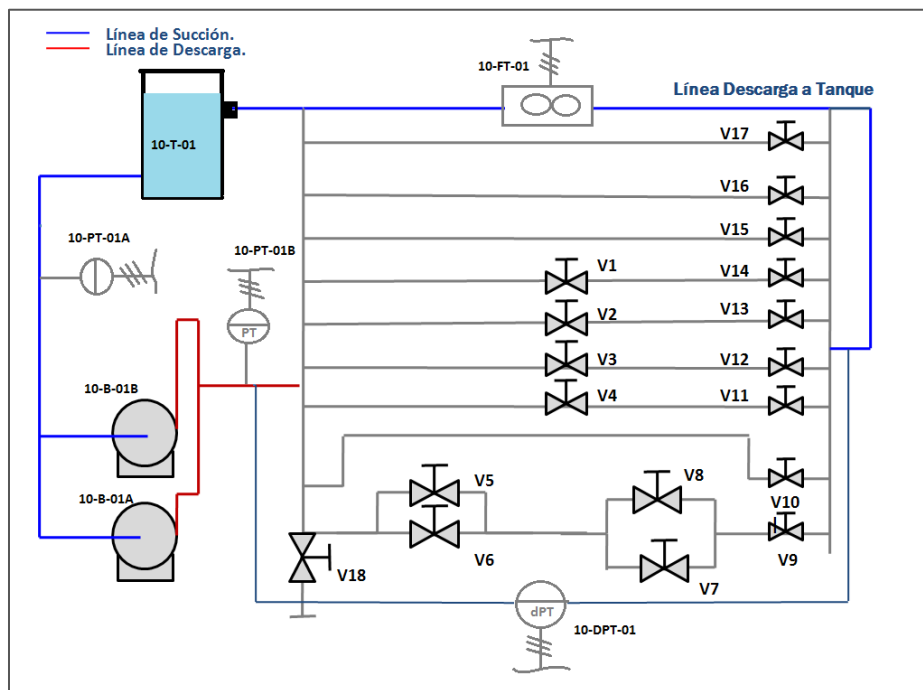
### 5.2 NARRATIVA DEL PROCESO

El proceso consta de un tanque de almacenamiento 10-T-01 de capacidad 190 litros que almacena agua la cual se dirige hacia un sistema de tuberías compuesta por

conexiones y válvulas que producen caídas de presión. El bombeo es realizado por dos bombas ubicadas en planta de capacidad máxima 4800 l/h capaces de generar la energía necesaria para conducir el flujo por la red de tuberías; el caudal máximo esperado en el sistema es de 9600 l/h. Una vez el agua fluya por las tuberías retorna al tanque por medio de la línea de retorno. El sistema ha sido diseñado para permitir el funcionamiento de una sola de las bombas o las dos operando en serie o paralelo, de igual forma en la red de tuberías se manipulan las válvulas para permitir el paso del fluido por las respectivas tuberías y de esta forma estudiar el efecto que tienen las mismas en la pérdida de presión del sistema.

### 5.3 P&ID's

Figura 36. P&ID's.

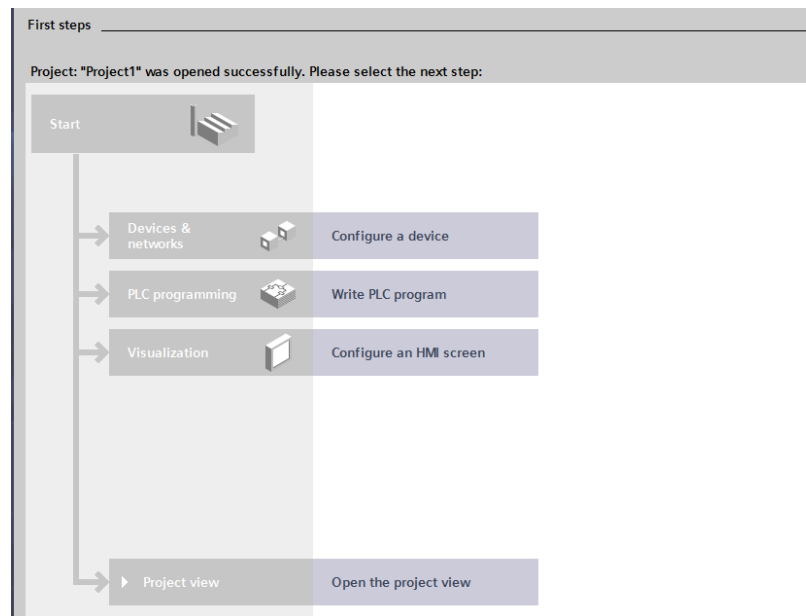


Fuente: Autores

## 5.4 TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES Y MUESTREO

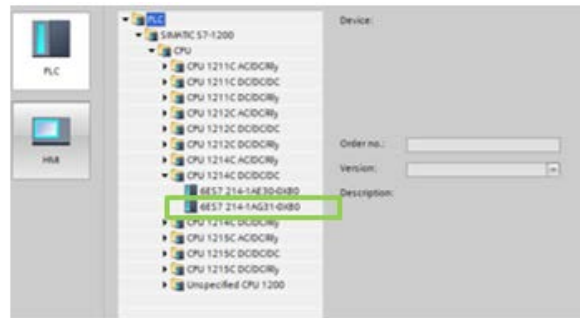
Para la adquisición de señales se hace uso del módulo de entradas y salidas análogas SM1234 del PLC S7-1200 que funciona como hardware; el software implementado para su programación lo proporciona el fabricante en una versión de prueba con licencia de treinta (30) días, y es conocido como STEP 7 V11.3, este software cuenta con una interfaz dinámica en la que se selecciona el tipo de PLC a utilizar, en segunda instancia se hace bosqueja la estructura del programa a realizar por el PLC y por último se entabla la comunicación software – hardware descargando las funciones a realizar al dispositivo y dando inicio a la ejecución.

Figura 37. Pantalla crear programa STEP 7



Fuente. Autores

Figura 38. Selección dispositivo a programar



Fuente. Autores

Antes de realizar la programación de la estructura principal, se crean las variables a utilizar en el software, en este caso se le da nombre, ubicación, tipo de variable y la opción visible para HMI.

Figura 39. Creación de variables STEP 7

	Name	Data type	Address	Retain	Visible..	Acces...	Cor
1	inpresD	Int	%IW96	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	incaud	Int	%IW100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	normpresD	Real	%MD102	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	leerpresD	Real	%QD0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	normcaud	Real	%MD4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	leercaud	Real	%QD8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	inpresS	Int	%IW98	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	normpresS	Real	%MD16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	leerpresS	Real	%QD20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	inpresDIF	Int	%IW102	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	normpresDIF	Real	%MD28	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
12	leerpresDIF	Real	%QD32	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
13	<Add new>			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Fuente. Autores

En la parte de programación se hizo uso principalmente de dos bloques:

Normalizar y escalar. El primero se usa para convertir el tipo de datos tomado por la CPU del PLC (Bits) a valor real entre el rango inferior y superior; el segundo bloque convierte este dato en formato real a real dentro del rango normalmente percibido por el modulo (corriente).

Figura 40. Bloque Normalizar\_X STEP 7



Fuente. STEP 7 V11.3

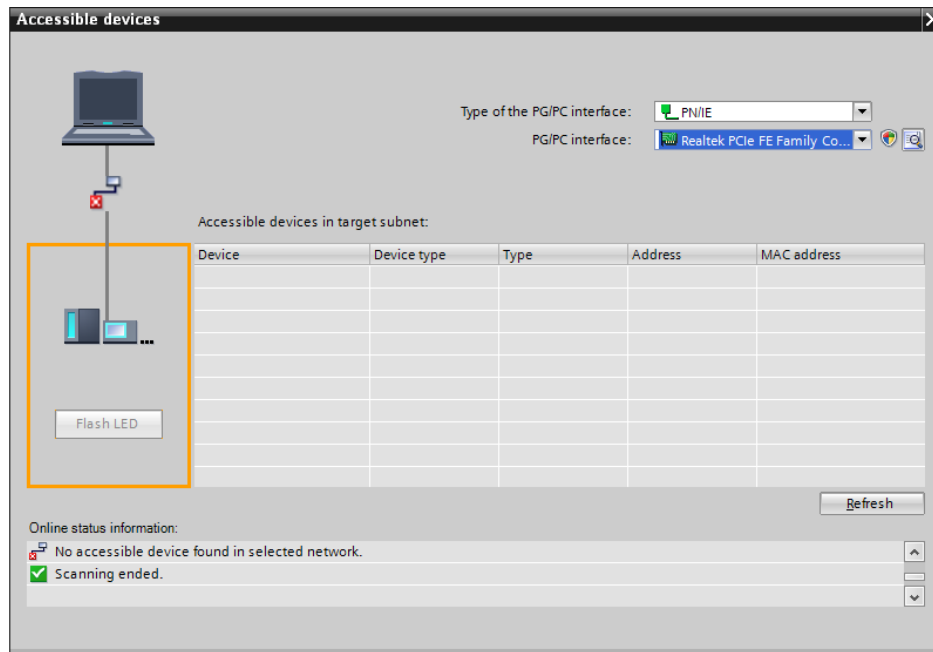
Figura 41. Bloque escalar\_X STEP 7



Fuente. STEP 7 V11.3

Una vez se cuenta con el programa correctamente estructurado, se asigna una dirección IP al computador y al dispositivo PLC y se procede a realizar la comunicación PLC – PC por medio de cable Ethernet.

Figura 42. Comunicación PLC - PC cable Ethernet



Fuente. STEP 7 V11.3

Se ejecuta el programa y haciendo uso de la opción de visualización de estado del programa se puede observar lo que está sucediendo en el PLC en tiempo real.

## 5.5 PROGRAMACIÓN EN ENTORNO LABVIEW

### 5.5.1 Comunicación Mediante OPC

\*OLE (Incrustación y enlazado de objetos)

El OPC (OLE para control de procesos) es una herramienta de software que sirve de canal de comunicación entre dos fuentes de datos que originalmente tienen diferentes protocolos de comunicación haciendo uso de su protocolo original.

Funciona con un servidor y un cliente OPC; el primero encargado de comunicar desde la fuente de datos y el segundo tiene la tarea de comunicarse con el sistema de monitoreo (muestreo gráfico); vale la pena aclarar que el funcionamiento de la interfaz

de comunicación funciona bidireccionalmente es decir, los clientes OPC (Maestro) pueden leer y escribir en los dispositivos a través del servidor OPC (Esclavo).

Figura 43. Esquema servidor OPC – cliente OPC



Fuente. Autores

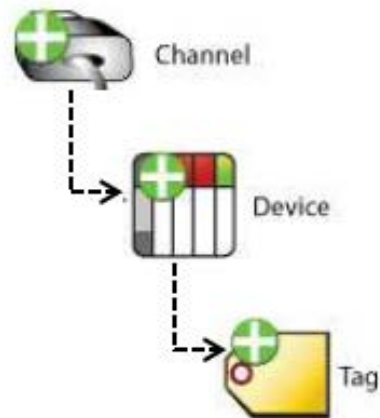
### 5.5.2 NI OPC SERVERS 2012

National Instruments soporta una amplia variedad de protocolos industriales para integrar la flexibilidad del software de diseño de sistemas NI LABVIEW y hardware de NI a sistemas existentes entre los que se encuentran PLC modernos que funcionen bajo conexión a Ethernet e integra datos con el sistema de monitoreo, base de datos u otro cliente OPC de forma flexible y escalable.

### 5.5.3 Configuración Servidor OPC

NI OPC SERVERS cuenta con un módulo de ajuste del servidor OPC en el cual se establece el tipo de dispositivo a utilizar y se definen las variables a usar por el servidor mencionado como lo muestra la figura.

Figura 44. Configuración servidor OPC



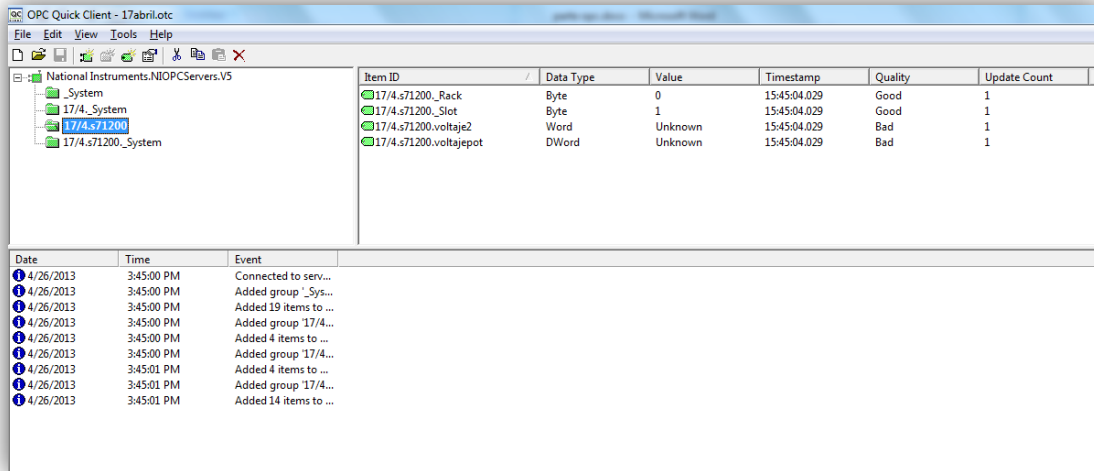
Fuente. Autores

Una vez se han seleccionado las “Tags” o variables con las que se va a trabajar en el OPC es importante especificar si solo van a ser leídas o también sobre ellas se va a escribir. Una vez finalizada esta configuración se dispone a ejecutar y configurar el cliente OPC.

#### 5.5.4 Configuración Cliente OPC

El módulo OPC “Quick Client” permite ver el estado o valor de las “Tags” previamente seleccionadas para trabajar con el OPC; los datos de interés de monitoreo son los tomados por el OPC y transcritos al protocolo de comunicaciones del software que funcionará como sistema de monitoreo.

Figura 45. Visualización cliente OPC



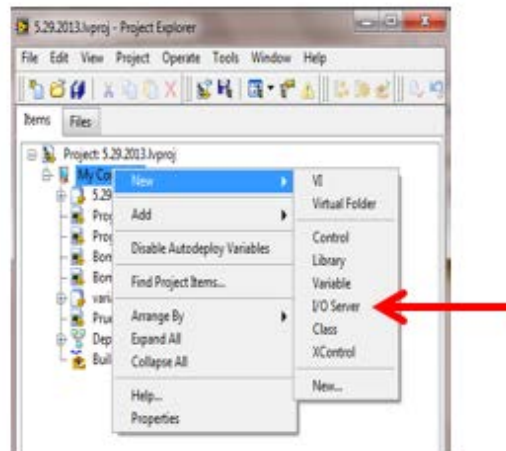
#### Fuente. Autores

Una vez la comunicación PLC- OPC se encuentra realizada se necesita transmitir la información proveniente del mismo al software de monitoreo, en este caso LABVIEW. (El modulo adicional para LABVIEW DSC es utilizado para el traspaso de datos). Para la comunicación se hace indispensable la ejecución del cliente OPC.

#### 5.5.5 Procedimiento Lógico Conexión LABVIEW – OPC utilizando I/O Server

- Se crea un nuevo proyecto en LABVIEW y a continuación se especifica que se va a trabajar con el servidor I/O.

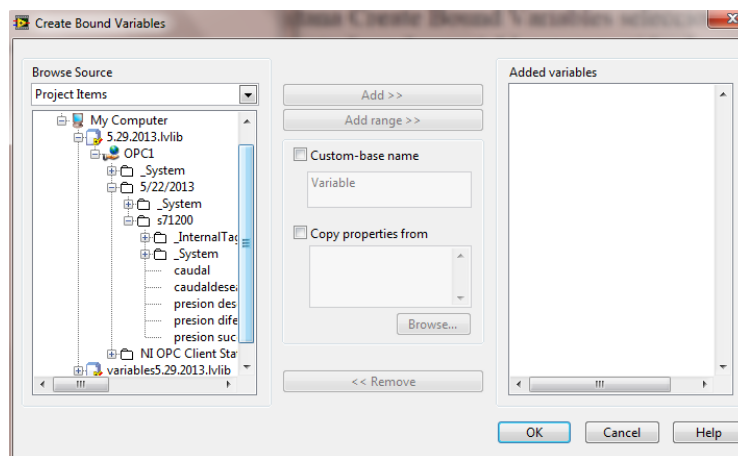
Figura 46. Creación I/O server LABVIEW



Fuente. Autores

Una vez se ha estipulado que se va a trabajar con el cliente OPC de LABVIEW, se procede a “llamar” las variables al proyecto; para lo cual en la ventana del proyecto se escoge la opción creación de variables compartida (“Bound Variables” para la versión en inglés).

Figura 47. Enlazado variables compartidas - LABVIEW



Fuente. Autores

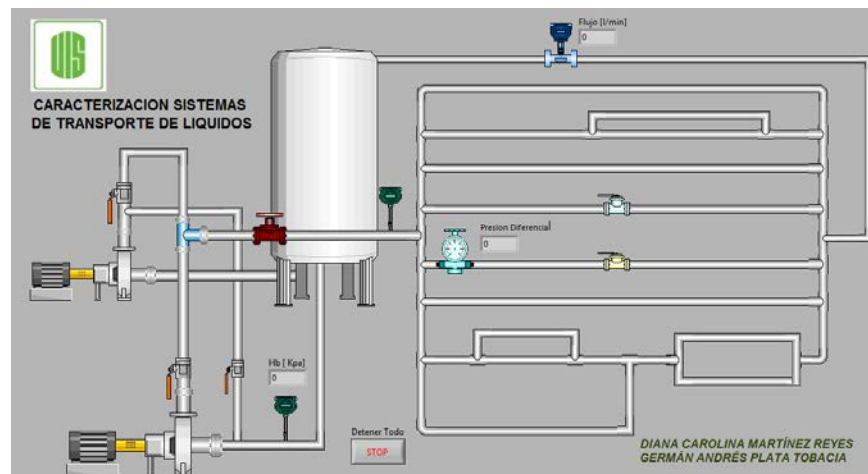
En esta ventana se seleccionan las etiquetas del OPC para vincularlas a las variables compartidas buscando los datos en el árbol del OPC.

Se procede a la creación del instrumento virtual (VI) en el que se creará la interfaz con el usuario y el código gráfico ejecutable.

### 5.5.6 Programación Panel Frontal

Para la elaboración de la interfaz con el usuario se plantea el uso de un “tab control”, herramienta de LABVIEW que permite desplegar pestañas en un solo instrumento virtual; en la primera pestaña se bosqueja el esquema del banco haciendo uso de la biblioteca “image navigator” del módulo DSC de LABVIEW.

Figura 48. Panel frontal LABVIEW



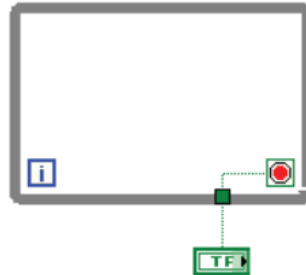
Fuente. Autores

En las siguientes pestañas se hace uso de la herramienta “XY Graph” para el bosquejo en tiempo real de la curva característica de la bomba, curva característica del sistema y datos instantáneos de potencia hidráulica desarrollada por la bomba.

### 5.5.7 Programación Diagrama de Bloques

Partiendo de lo general a lo particular, en la disposición presente en el diagrama de bloque se encuentra un “while loop” herramienta que permite ejecutar el programa cíclicamente hasta que alguna instrucción externa diga lo contrario.

Figura 49. Herramienta while loop LABVIEW

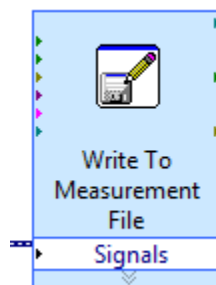


Fuente. Autores

A continuación se hace un llamado a las variables que se van a usar para el bosquejo grafico en la interfaz con el usuario, y se realiza la manipulación pertinente para ser llevadas como vectores auto expandibles a “XY Graph”.

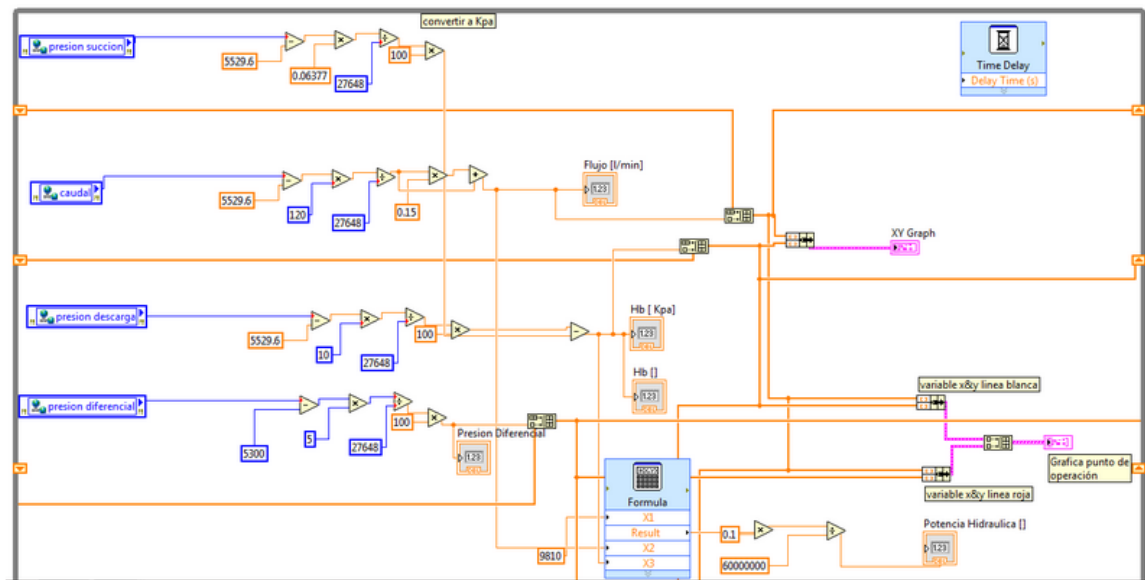
Dentro del programa se anexó la opción de almacenamiento de datos en Excel para lo cual se usó y configuró el bloque “Write to Measurement File”.

Figura 50. Herramienta write to measurement file LABVIEW



Fuente. Autores

Figura 51. Diagrama de bloques



Fuente: Autores

Una vez este procedimiento es terminado el programa se encuentra listo para ser ejecutado y permitir la visualización de las curvas características de las bomba y el sistema.

## 6 ANALISIS DE RESULTADOS

### 6.1 MUESTREO GRAFICO DE RESULTADOS

Gracias a la opción disponible en la interfaz gráfica del banco, que permite almacenar datos provenientes del sistema de monitoreo en un archivo Excel, se pueden obtener los valores correspondientes a altura de la bomba, altura de pérdidas, y caudal suministrado; por lo cual es posible evidenciar la curva de la bomba y la curva del sistema. Asimismo se presenta la tabla que relaciona el caudal suministrado por la bomba con la potencia eléctrica consumida además de la potencia hidráulica desarrollada y la eficiencia global del sistema.

En este análisis se realizaron 4 pruebas cada una de las cuales se repitió dos veces, en todos los casos exceptuando el análisis de pérdidas el fluido era transportado por las líneas 4, 5, 6 y 7 adaptadas en paralelo.

Para cada una de las pruebas se realizó el siguiente procedimiento:

1. Encendido del banco, para esto; activación de los breakers que se encuentran dentro del tablero de control y “switch” de llave que se encuentra en la puerta del tablero.
2. Dar alimentación al PLC así como todos los instrumentos y la fuente de alimentación del tablero de control.
3. Conectar el cable Ethernet al PLC S7 1200 verificando que éste se encuentre en modo “RUN”, de lo contrario, utilizar el Step 7 para poner la CPU en modo “RUN”.
4. En el computador, apertura del fichero OPC client seguido del archivo de LABVIEW que contiene la plataforma de trabajo para la práctica.
5. Verificación de las válvulas de descarga y succión, así como las válvulas de conexión a los manómetros.
6. Encendido de la (las) moto-bomba(s) respectiva(s).

7. Variación del flujo de 5 en 5 LPM desde máximo a mínimo a través de la válvula de compuerta que se encuentra en la descarga; en el caso de regulación con variador de frecuencia variación de frecuencia de 5 en 5 Hz.

8. Medición de la corriente eléctrica consumida con la ayuda de la pinza voltiamperimétrica, y almacenado de datos.


A continuación se presenta la tabla utilizada para la medición y recopilación de datos de potencia eléctrica y potencia hidráulica.

Tabla 5. Datos curva característica bomba

<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b> <b>LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS</b>		
	Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos	
Fecha:	Bomba Activa:	
Caudal [lpm]	Altura Bomba [Kpa]	Potencia Hidraulica [Kw]

Fuente. Autores

Tabla 6. Datos eléctricos bomba

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS							
		Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos					
Fecha:		Motor Monofasico		Motor Trifasico			Eficiencia %
Caudal [lpm]	Potencia Hidraulica [Kw]	Potencia Electrica [Kw]	Frecuencia [Hz]	Potencia Linea 1 [Kw]	Potencia Linea 2 [Kw]	Potencia Linea 3 [Kw]	

Fuente. Autores

Tabla 7. Datos caracterización perdidas

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS			
		Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos	
Fecha:		Linea(s) Activa(s):	
Las lineas activas se encuentran en:		Paralelo	Serie
Densidad del Agua:		Viscosidad del Agua:	
Caudal [lpm]		Presion diferencial [Kpa]	

Fuente. Autores

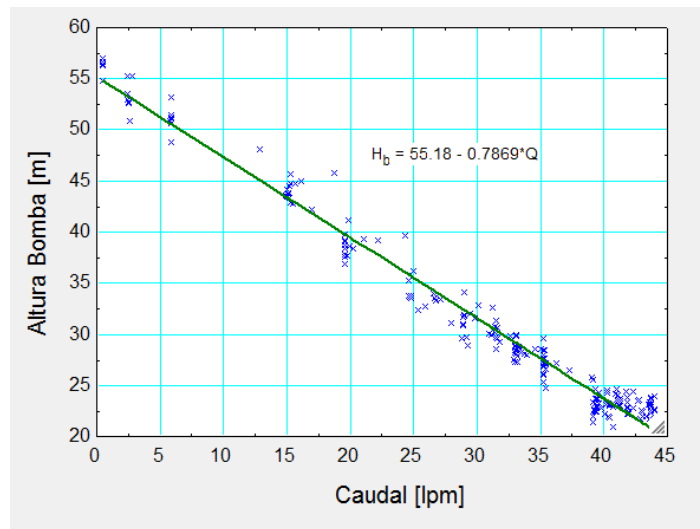
## 6.2 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.2.1 Bomba Centrifuga Motor Monofásico Regulación Con Válvula En La Descarga

Para la obtención de la curva característica de la bomba se crea la regresión con la ayuda de EES para un polinomio de la forma  $H_b = a - bQ$  en donde  $y$  representa la altura desarrollada por la bomba y  $x$  el caudal impulsado por la misma; el factor  $b$  que generalmente acompaña el polinomio y que corresponde al factor de pérdidas se retiró del mismo ya que para el caso de la bomba utilizada al tratar de ajustar la regresión con ese término arrojaba un coeficiente positivo lo cual no satisface la teoría esperada; por otro lado en la curva proporcionada por el fabricante se puede observar que dentro del rango de caudales usado para el muestreo el comportamiento de la curva es lineal. A continuación se presenta la curva obtenida con su respectiva ecuación.

\*los datos que sirvieron de referencia para la generación de las curvas se encuentran compilados en una tabla en el anexo F.

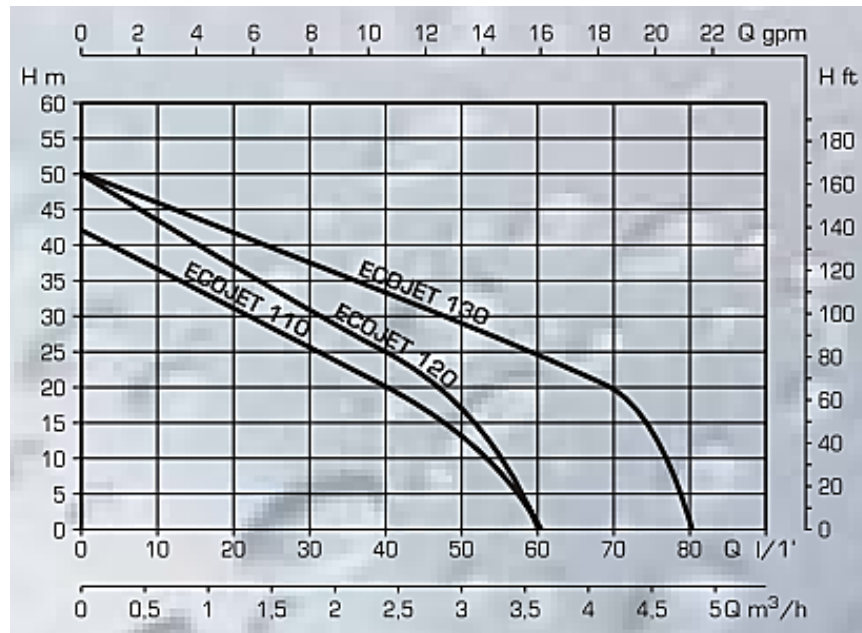
Figura 52. Curva característica bomba motor monofásico



Fuente. Autores

En la figura se puede observar que la altura desarrollada por la bomba en el punto de SHUT OFF corresponde a un valor de 55 m valor cercano al esperado por la curva del fabricante (figura 53) en la que se establece el valor en 50 m.

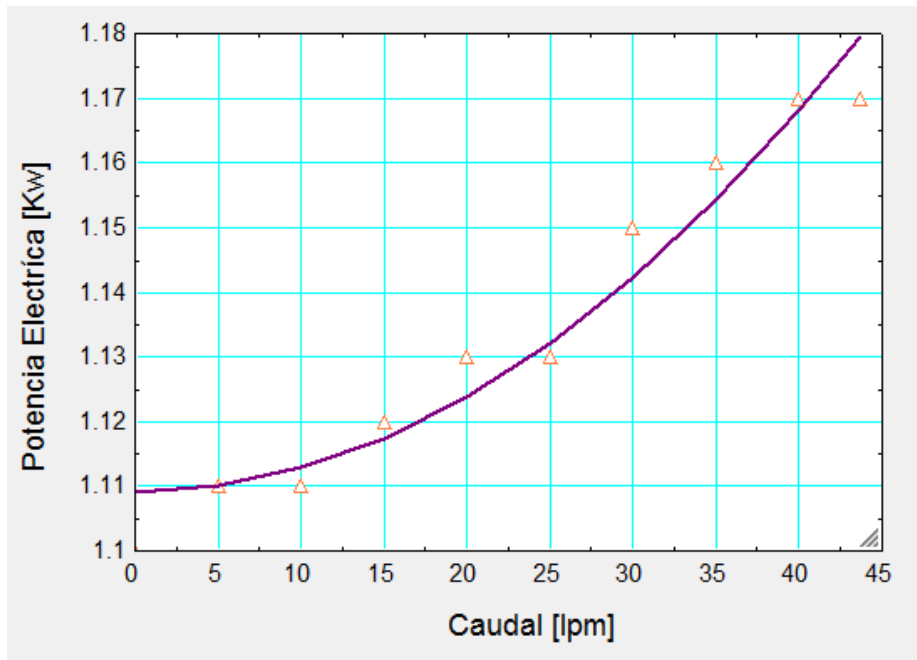
Figura 53. Curva bomba centrifuga según fabricante



Fuente. Curva característica bombas comerciales. Imagen tomada de <http://www.leaderpumps.com/>

Para la potencia consumida y haciendo uso de la tabla 2 anexo F se obtuvo el muestreo grafico presentado en la figura 54 en el que se observa una tendencia creciente en la relación caudal potencia consumida.

Figura 54. Potencia eléctrica bomba motor monofásico

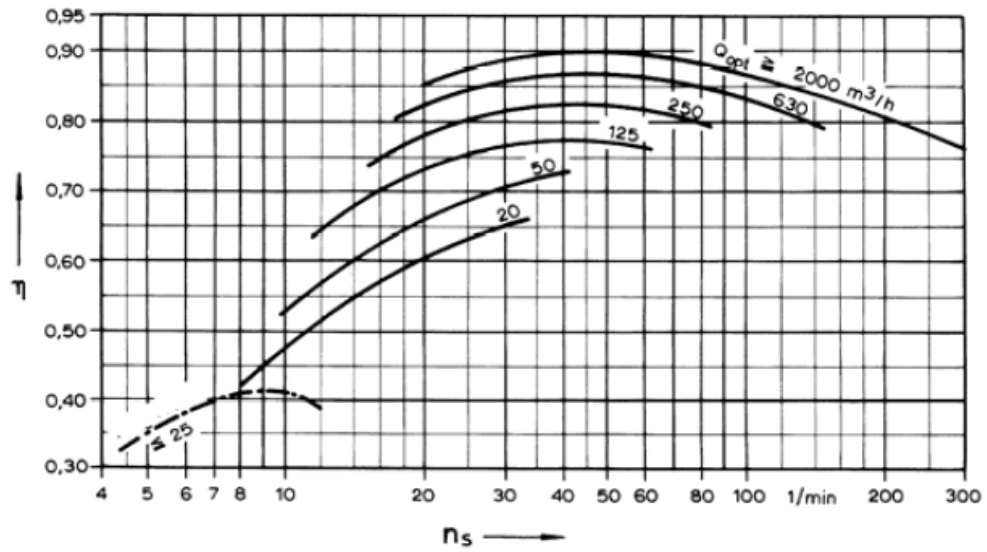


Fuente. Autores

De acuerdo a SIHI Sterling <sup>2</sup> la relación eficiencia – caudal tiene una tendencia creciente hasta llegar al punto de máxima eficiencia, punto a partir del cual dicha relación toma una pendiente negativa. En la figura 55 se evidencia una tendencia creciente en la eficiencia por lo cual se puede presumir el punto de máxima eficiencia no ha sido alcanzado y se necesita de más flujo en el sistema para llegar a él. De igual forma la misma referencia cita que para bombas que impulsen un flujo menor de 25 m<sup>3</sup>/h el valor de la eficiencia se encuentra en el rango de 30 a 40% (esto únicamente para la bomba a lo cual se debe multiplicar el valor de la eficiencia del motor). Figura 55

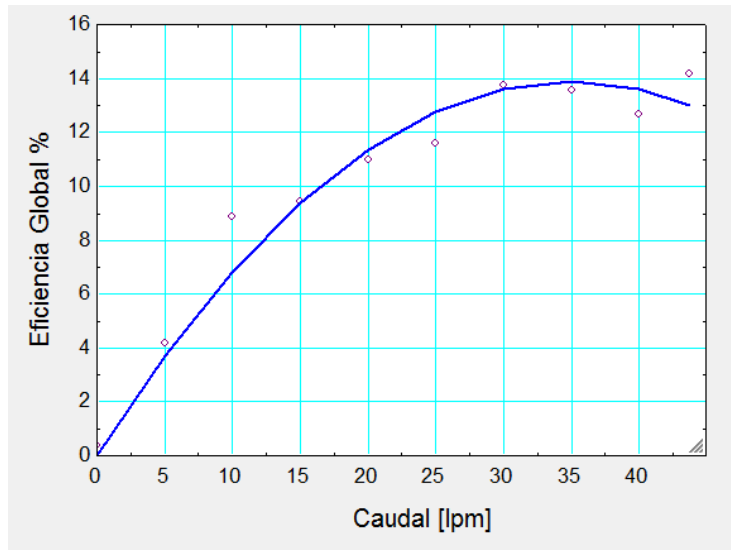
<sup>2</sup> Sterling fluid systems B.V Principios básicos para el diseño de instalaciones de bombas centrífugas 7<sup>a</sup> edición página 49.

Figura 55. Eficiencia esperada bombas a diferente velocidad especifica



Fuente. Sterling SIHI Principios básicos para el diseño de instalaciones de bombas centrífugas

Figura 56. Eficiencia global bomba motor monofásico



Fuente. Autores

### 6.2.2 Bomba Centrifuga Motor Trifásico Regulación Con Válvula En La Descarga

Trabajando con la bomba acoplada a un motor trifásico se ajusta el valor de frecuencia de alimentación en 45 Hz y se hace uso de la válvula de compuerta ubicada en la descarga del sistema para la regulación del caudal impulsado.

Con el uso de la función regresión en EES se obtuvo la línea que mejor se ajustara a los datos obtenidos y su respectiva curva. (Figura 57)

La ecuación obtenida corresponde a una de las curvas semejantes a la figura 52, conociendo que estas son bombas idénticas y una está girando a una velocidad de 3600 rpm y la otra a 2700 rpm; en este caso con la ayuda de las leyes de semejanza para bombas idénticas a diferente velocidad de giro se hace la construcción de la curva teórica y se comprueba la similitud con la curva obtenida experimentalmente.

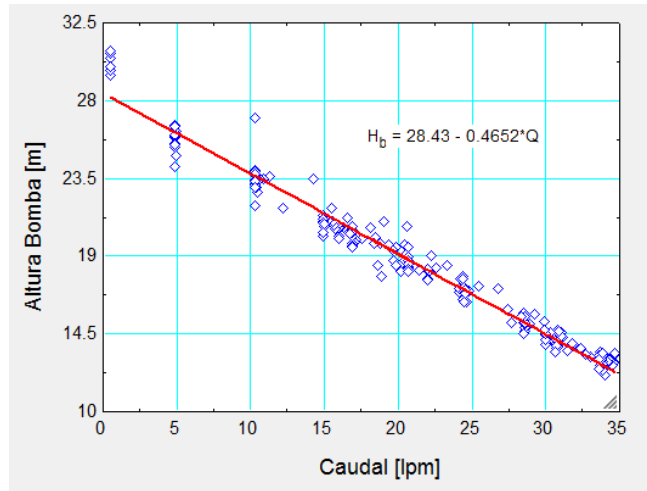
Curva Característica bomba @ 3600 rpm:  $H = 55.18 - 0.7869 \cdot Q$

Curva Característica bomba @ 2700 rpm aplicando leyes de semejanza:

$H = 24.86 - 0.5279 \cdot Q$

Curva Característica bomba @ 2700 rpm experimental:  $H = 28.43 - 0.4652 \cdot Q$

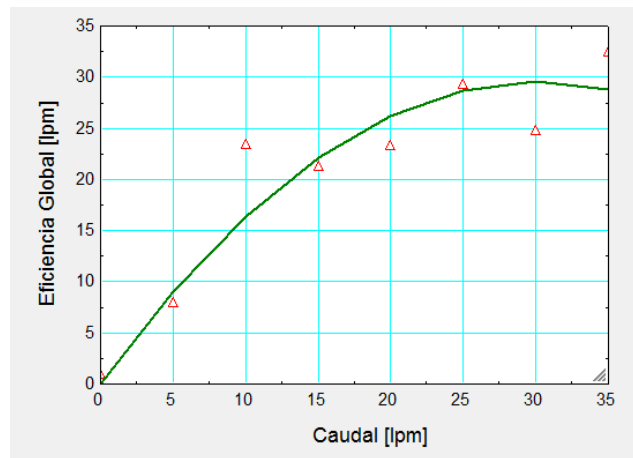
Figura 57. Curva característica bomba motor trifásico regulación con válvula



Fuente. Autores

En la figura 58 al igual que en la figura 56 (eficiencia monofásica) se evidencia una tendencia creciente en la curva por lo cual de nuevo se presume el punto de máxima eficiencia global no ha sido alcanzado, por otro lado el máximo valor de eficiencia para el caso bomba motor trifásico regulación con válvula en la descarga es del 32% con respecto al 14% del sistema bomba motor monofásico regulación con válvula en la descarga.

Figura 58. Eficiencia global bomba motor trifásico



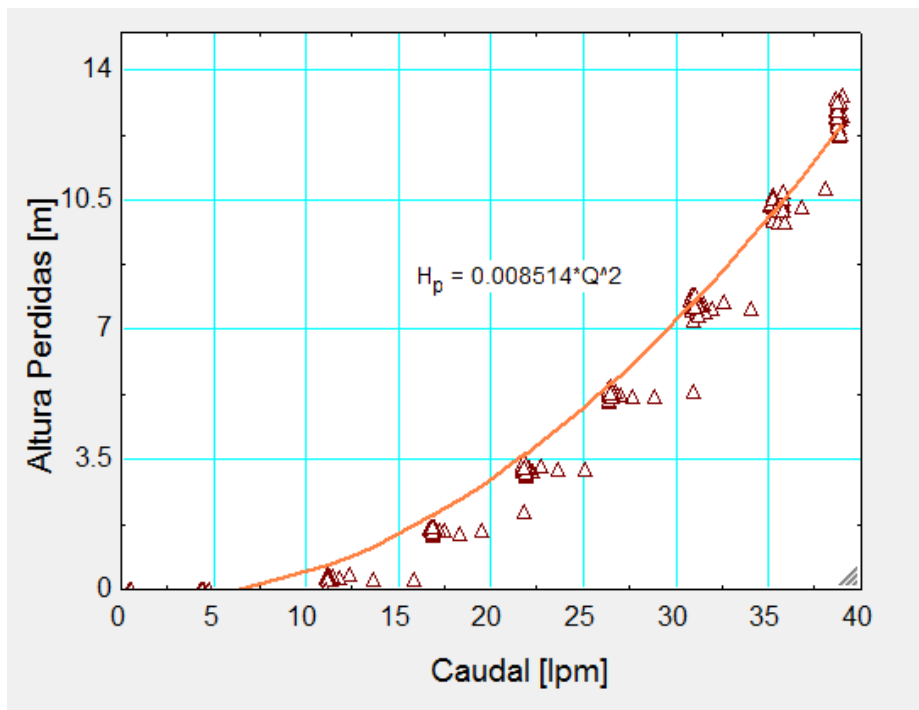
Fuente. Autores

### 6.2.3 Bomba Centrifuga Motor Trifásico Regulación Con Variador de Frecuencia

#### 6.2.3.1 Bomba Centrifuga Motor Trifásico Regulación Con Variador de Frecuencia válvula en la descarga totalmente abierta

Una bomba centrifuga supe los requerimientos de presión solicitados por el sistema a un caudal dado, con un sistema constante y regulación de flujo implementada por variador de velocidad se obtiene en punto de corte sistema – bomba para una familia de curvas de una bomba centrifuga a diferente velocidad de giro; en la gráfica presentada a continuación se puede ver este punto de funcionamiento; a la vez que sirve de referencia para que por medio de una regresión se obtenga la curva característica del sistema.

Figura 59. Bomba centrifuga regulación con variador válvula full open

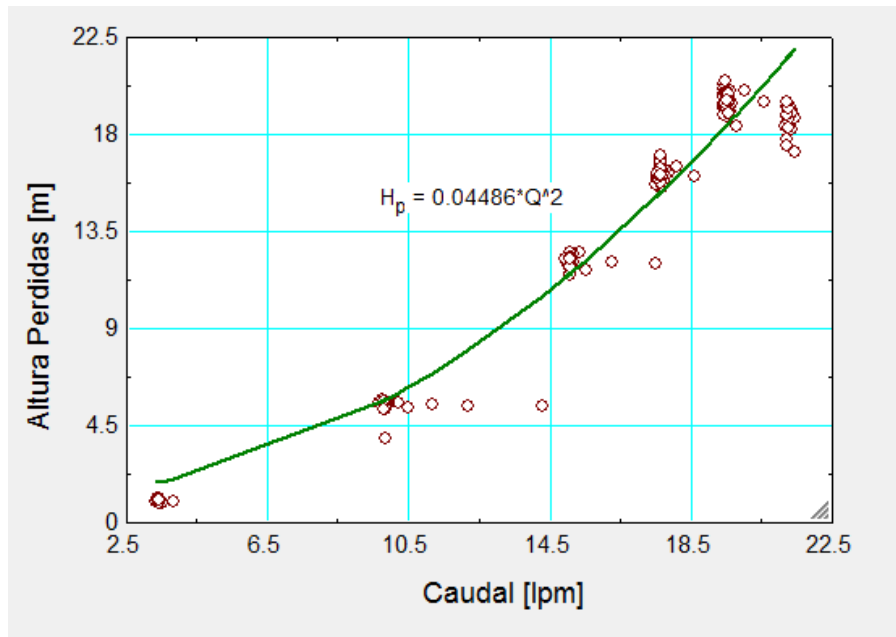


Fuente. Autores

### 6.2.3.2 Bomba Centrífuga Motor Trifásico Regulación Con Variador de Frecuencia válvula en la descarga 50% de apertura

En el caso de válvula “half open” se obtiene que la curva característica del sistema cambia, gracias a la relación existente entre K de pérdidas y porcentaje de apertura para una válvula, la figura presentada a continuación nos muestra la nueva curva obtenida por el cruce entre curva de sistema – familia de curvas bomba centrífuga a diferentes revoluciones.

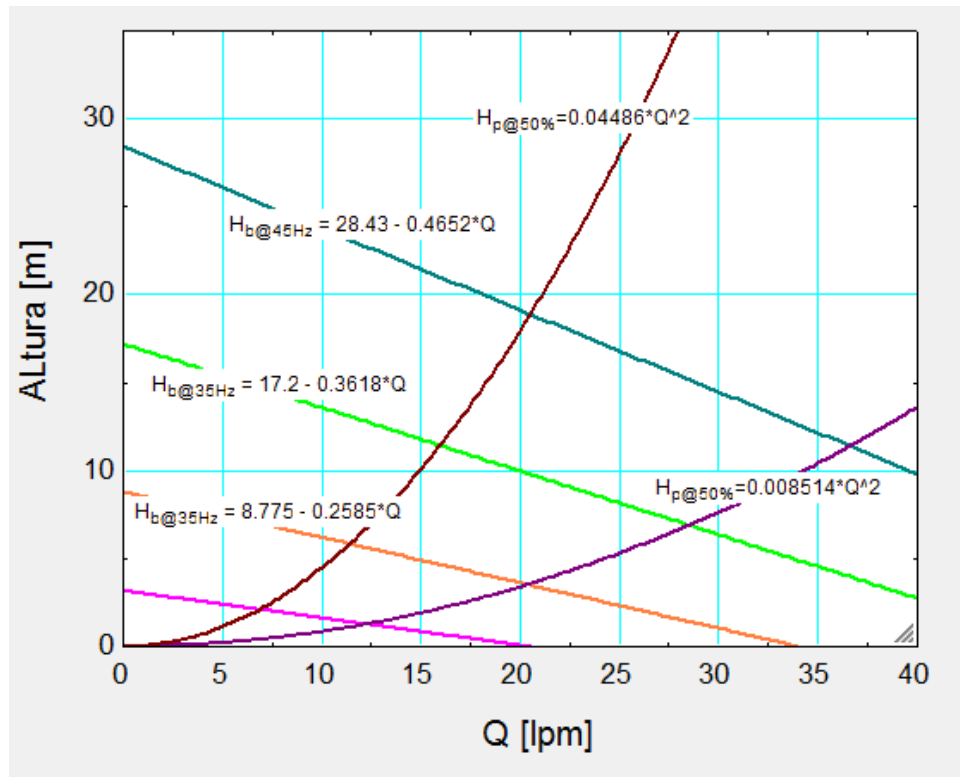
Figura 60. Bomba centrífuga regulación con variador válvula half open



Fuente. Autores

Haciendo uso de las leyes de semejanza geométrica y partiendo de la curva característica obtenida experimentalmente para la bomba girando a una velocidad de 2700 rpm se obtiene la familia de curvas a diferente velocidad de giro; de igual forma usando las curvas 59 y 60 que representan la curva característica del sistema se obtiene la figura 61 presentada a continuación.

Figura 61. Familia de curvas bomba centrífuga – sistema



Fuente. Autores

#### 6.2.4 Bombas Acopladas En Serie

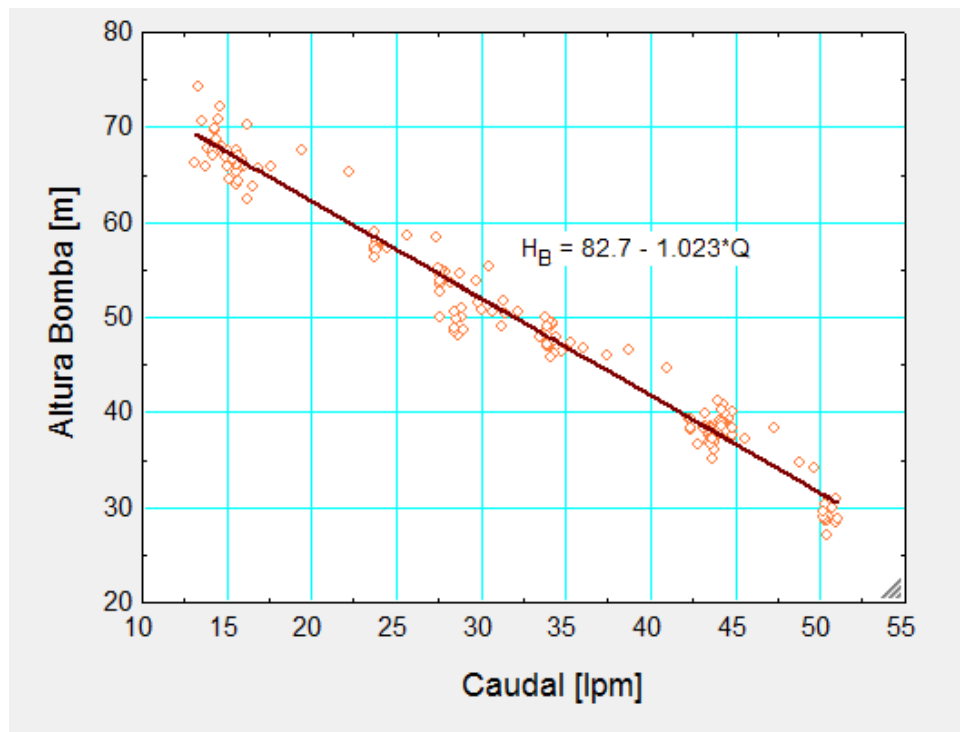
Dos bombas son acopladas en serie cuando la presión requerida por el sistema no alcanza a ser suplida por una sola de las bombas operando en solitario; para este acople se conectan la descarga de la bomba A con la succión de la bomba B. La altura de presión desarrollada por las bombas corresponde a la suma de altura desarrollada por cada una de las bombas individualmente.

[1]

Aplicando la ecuación [1] y haciendo uso de las curvas obtenidas experimentalmente para cada una de las bombas 1 y 2 la curva del acople estaría dada por:

La figura 62 representa la relación altura – caudal obtenido experimentalmente para el acople de las bombas en serie.

Figura 62. Curva característica bombas en serie

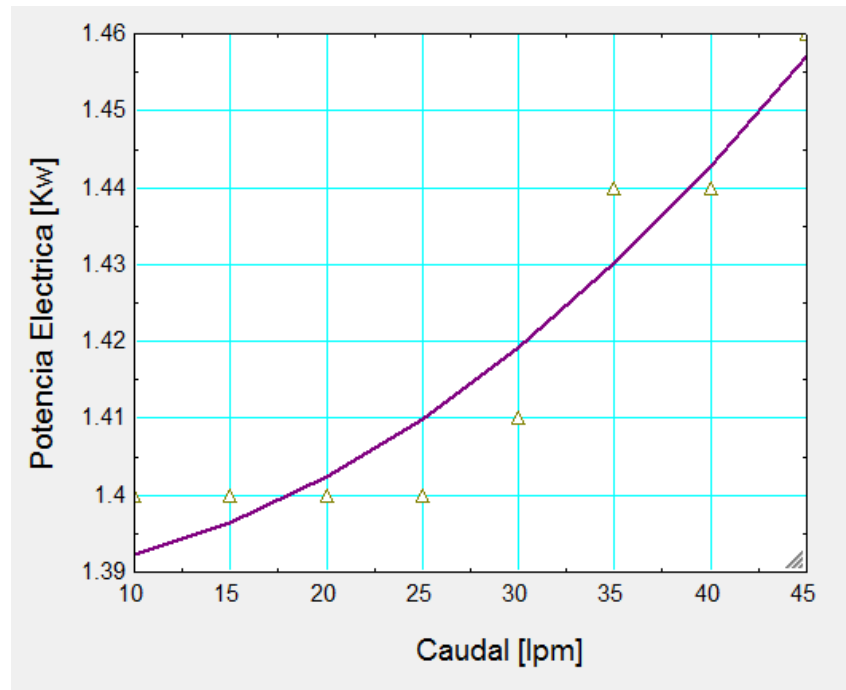


Fuente. Autores

Para la medición de potencia consumida por las bombas en serie se realiza la toma para cada una de las líneas del motor trifásico a la vez que para el motor monofásico; la suma de estos valores corresponde a la potencia consumida por el

sistema; en la gráfica 63 se presenta la relación de esta potencia con el caudal impulsado por las dos bombas funcionando en serie.

Figura 63. Potencia eléctrica bombas en serie



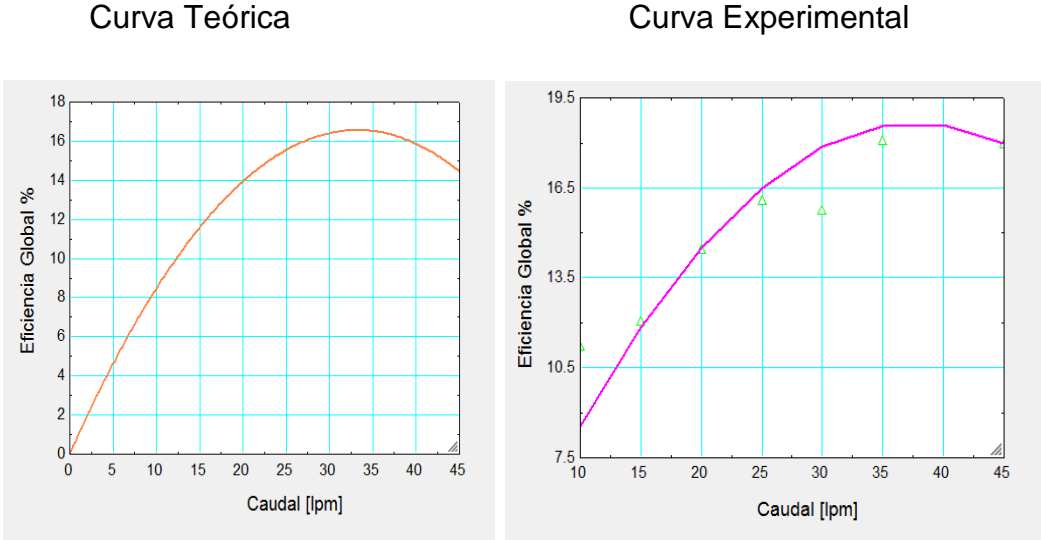
Fuente. Autores

Para dos bombas centrífugas acopladas en serie se tiene que la eficiencia global está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{P_{\text{teórica}}}{P_{\text{eléctrica}}} = \eta_{\text{global}} \quad [2]$$

Conocidas la altura desarrollada y la eficiencia de cada una de las bombas a acoplar en función del caudal impulsado, se puede obtener la curva eficiencia global bombas en serie – caudal teórica a partir de la ecuación [2]

Figura 64. Eficiencia global bombas en serie



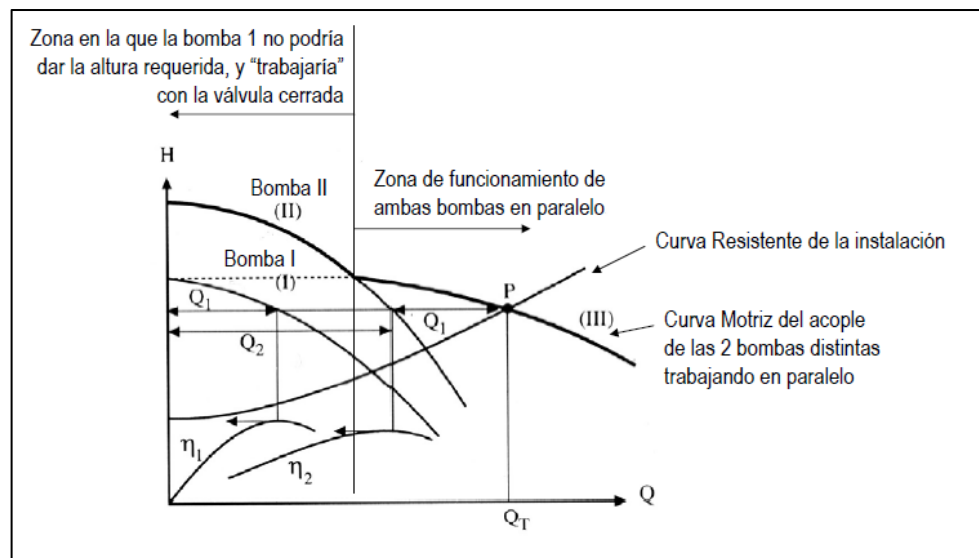
Fuente. Autores

### 6.2.5 Bombas Acopladas En Paralelo

En sistemas donde la fluctuación de caudal es tal que el flujo impulsado por una sola bomba centrífuga operando en solitario no alcanza para suplir las necesidades del sistema, se opta por acoplar dos bombas en paralelo.

En el acople de dos bombas en paralelo se debe tener la precaución de que estas bombas sean idénticas para que no se dé el caso tal que a un caudal estipulado sea una sola de las bombas la que opere.

Figura 65. Bombas centrífugas distintas en paralelo



Fuente. Área de mecánica de fluidos – Universidad Jaume I – Teoría Tema 18

Este es el caso que se presenta al intentar acoplar la bomba con motor monofásico a la bomba con motor trifásico en paralelo; como la primera de ellas opera a 3600 rpm desarrolla mayor cabeza que la segunda operando a 2700 rpm. Por tal razón al intentar realizar la práctica se obtuvieron valores que no se ajustan a la teoría con respecto a acople de bombas.

Para una práctica posterior se recomienda adaptar un variador de velocidad a la bomba 1 y que de esta forma si se cuenta con bombas idénticas.

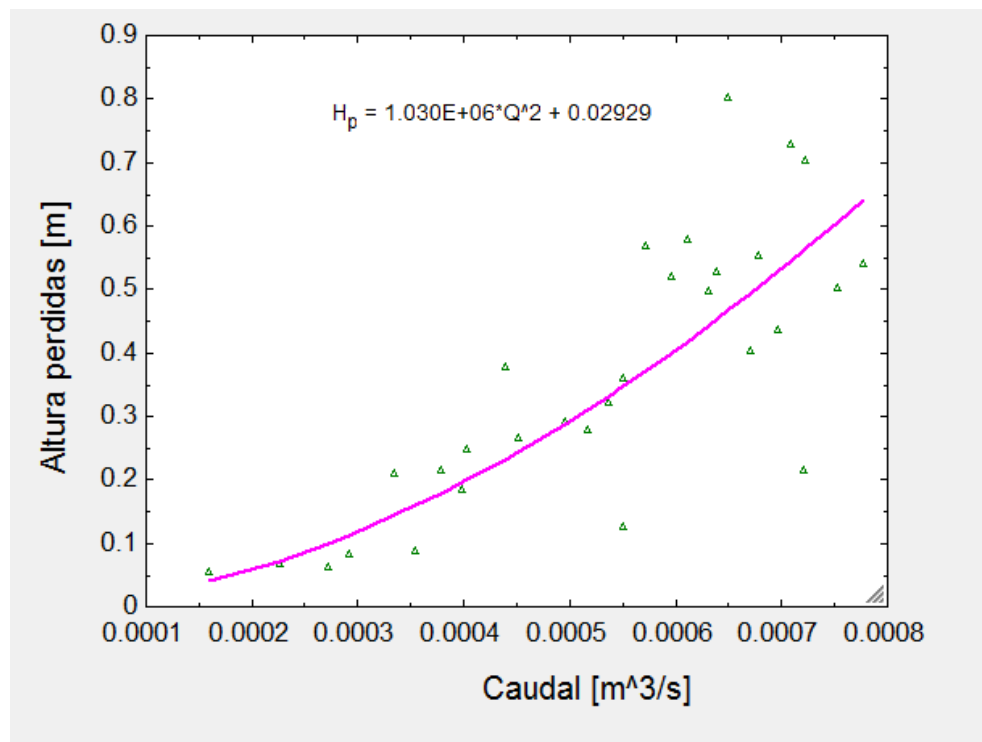
### 6.2.6 Caracterización de pérdidas en red de tuberías

Para la evaluación del comportamiento de pérdidas por una tubería se hace pasar el flujo de la bomba en operación por una línea y se obtienen datos de presión aguas arriba y aguas abajo para la tubería.

Se hace uso de la teoría presentada por Darcy-Weishback<sup>3</sup> para determinar el diferencial teórico y se compara este resultado con el obtenido experimentalmente.

A continuación se presentan los datos obtenidos y calculados para la línea 1, como la curva experimental y teórica de evolución de pérdidas en función del caudal.

Figura 66. Caracterización pérdidas línea 1




Fuente. Autores

<sup>3</sup> Ecuación general de las pérdidas primarias de DARCY – WEISBACH

En la figura 66 los puntos de la dispersión representan los datos obtenidos experimentalmente por el sistema de monitoreo y la curva representa lo que se obtiene de la teoría; se observa en la gráfica una buena aproximación de los resultados experimentales con respecto a lo logrado por la teoría a excepción de algunos puntos que por razones de calidad de medición se salen de lo deseado.

Tabla 8. Datos pérdidas de flujo línea 1

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS						
		Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos				
Fecha: 8 Julio de 2013	Linea(s) Activa(s): 1		Diametro Interior Tuberia [mm]		Longitud [m]	
Las líneas activas se encuentran en:		Paralelo	Serie	20.93		2.5
Densidad del Agua [Kg/m <sup>3</sup> ]: 997.1	Viscosidad del Agua [Kg/m*s]: 0.0008905					
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Presion diferencial [m]	Numero de Reynols	Factor de Fricción	Hf perdidas Teorico [m]	% Error	
0.000160	0.0572	10898.818	0.030	0.040	44%	
0.000226	0.0683	15375.301	0.028	0.072	5%	
0.000272	0.0646	18548.503	0.026	0.100	36%	
0.000291	0.0849	19840.450	0.026	0.113	25%	
0.000334	0.2122	22747.331	0.025	0.144	48%	
0.000354	0.0886	24141.273	0.025	0.159	44%	
0.000379	0.2159	25801.538	0.024	0.179	20%	
0.000398	0.1864	27087.819	0.024	0.195	5%	
0.000403	0.2491	27433.471	0.024	0.200	25%	
0.000439	0.3783	29887.037	0.023	0.232	63%	
0.000452	0.2657	30765.334	0.023	0.244	9%	
0.000495	0.2916	33689.214	0.023	0.287	2%	
0.000517	0.2786	35247.483	0.023	0.311	10%	
0.000536	0.3229	36488.432	0.022	0.331	2%	
0.000551	0.1273	37542.389	0.022	0.348	63%	
0.000551	0.3617	37531.056	0.022	0.348	4%	
0.000572	0.5702	38930.665	0.022	0.371	54%	
0.000596	0.5204	40590.930	0.022	0.400	30%	
0.000611	0.5794	41616.554	0.022	0.418	39%	
0.000631	0.4982	42987.831	0.022	0.443	13%	
0.000639	0.5278	43537.475	0.022	0.453	17%	
0.000650	0.8046	44291.111	0.021	0.467	72%	
0.000671	0.4041	45690.720	0.021	0.493	18%	
0.000678	0.5555	46200.699	0.021	0.503	10%	
0.000697	0.4373	47452.981	0.021	0.528	17%	
0.000708	0.7289	48229.282	0.021	0.543	34%	
0.000721	0.2159	49141.578	0.021	0.562	62%	
0.000723	0.7049	49237.907	0.021	0.564	25%	
0.000753	0.5038	51272.157	0.021	0.606	17%	
0.000777	0.5425	52921.089	0.021	0.641	15%	

## CONCLUSIONES

➤ Se implementó un sistema de monitoreo del banco de caracterización de sistemas de transporte de líquidos en entorno LABVIEW; que permitió corroborar experimentalmente la teoría respectiva a funcionamiento de bombas centrifugas, sistema de pérdidas en tuberías como acople de bombas en serie – paralelo. Se obtuvieron curvas características de:

- Bomba centrifuga con Motor Monofásico

- Bomba centrifuga con Motor Trifásico

- Bombas centrifugas Acopladas en Serie

- Sistema

- Eficiencia global sistema

A la vez que se pudo obtener un muestreo grafico de potencia hidráulica desarrollada por la/las bomba/as y potencia eléctrica consumida

➤ Se realizó el diseño de las prácticas para el estudio de bombas centrifugas, bombas en serie-paralelo y pérdida de carga así como un manual de conexiones y actividades de mantenimiento centrados en las recomendaciones del fabricante de los equipos.

➤ Se adecuó el tablero de control de banco en el cual se encuentran los elementos de control (PLC), instrumentación (Manómetros) y seguridad del banco (Relé térmico y Breakers) desde el cual se pone en funcionamiento el mismo y se realiza la operación.

➤ Se brinda a la universidad y en su representación a la Escuela de Ingeniería Mecánica un banco para el estudio de fenómenos relacionados con el transporte de líquidos, el cual posee equipos de última tecnología y brinda al estudiante la capacidad de ver y afianzar experimentalmente conceptos teóricos.

➤ Respecto a los resultados de las pruebas realizadas:

- Se corroboró la utilidad del polinomio de la forma  $H = H_0 - KQ^2$  para la determinación de la curva característica de una bomba centrífuga.
- Se obtuvieron valores de eficiencia global del sistema bomba – motor del orden del 30% que corresponden a los valores de eficiencia esperado por bombas centrífugas que manejen flujos menores a los  $25 \text{ m}^3/\text{h}^1$ .
- Se corroboró la precisión que tienen las leyes de semejanza en la creación de familias de curvas de una bomba centrífuga girando a diferente velocidad.
- Los resultados mostraron que en cuanto a eficiencia se refiere la bomba con motor trifásico es más eficiente que la bomba con motor monofásico a un mismo valor de flujo.
- La eficiencia de la configuración moto-bomba trifásica regulación por válvula de descarga es mayor que la obtenida mediante la variación con variador de frecuencia debido al sobredimensionamiento del sistema, puesto que la potencia hidráulica es un producto de caudal por presión, como la regulación por válvula de descarga implica una mayor demanda de presión, este producto se incrementa, contrario a lo que sucede cuando la demanda de presión permanece constante, razón principal de los bajos rendimientos de los equipos. Se estima que en un sistema no sobredimensionado, la demanda de presión podría resultar en una mayor eficiencia mediante la regulación por variación de frecuencia.
- En la configuración de bombas en paralelo los equipos deben ser idénticos puesto que al acoplar bombas con características diferentes, esto imposibilita el flujo de una de ellos por la acción del check ubicado en la descarga haciendo que opere en el punto de “Shut Off”.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda la adquisición de un analizador de redes trifásico para la mejora en la medición de potencia eléctrica debido a que éste permite obtener inmediatamente el valor del consumo energético en cada una de las líneas de los motores y facilita el almacenamiento de los datos.
- Se recomienda la implementación de una electroválvula proporcional en la descarga de las bombas con miras a realizar estudios comparativos entre el tipo de control de flujo por variador de velocidad de giro Vs electroválvula, además de permitir mayor precisión en la regulación de flujo comparada con una válvula manual.
- Se recomienda implementar un sistema de control continuo con el fin de ampliar el alcance de las prácticas además de permitir una mayor facilidad a la hora de realizar las mismas.
- Se recomienda adaptar un variador de velocidad a la bomba 1 (monofásica) con miras a realizar la práctica de acople de bombas en paralelo (puesto que las dos deben ser idénticas).
- Se recomienda añadir al banco la posibilidad de analizar el método de regulación por "By-pass".
- Se recomienda no exceder el valor de la frecuencia de alimentación para el motor trifásico del valor de 45 [Hz] debido a que esto produciría un aumento en la velocidad de giro del impulsor ocasionando un aumento en la potencia que llevaría al sistema a condiciones peligrosas de operación y podría ocasionar daños en el motor.

—

## BIBLIOGRAFÍA

CRANE. Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Mc Graw Hill, México, 1999. 215p.

FERNANDEZ DIEZ, Pedro. Bombas Centrífugas y Volumétricas. COMUNIDAD AUTÓNOMA DE CANTABRIA: Universidad de Cantabria. 123p.

FOX, Robert W., y MCDONALD, Alan T. Introducción a la mecánica de fluidos. 2 ed. México: McGraw-Hill, 1995. p.270-275.

FRANCO CADENA, Hermes Samir. Evaluación y selección del sistema de adquisición de datos para el laboratorio de mecánica de fluidos adscrito a la escuela de ingeniería mecánica. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2007. 140p.

GARCÍA, Clemente. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México D. F. McGraw-Hill, 1987. 215p.

MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. 2 ed. Madrid: Ediciones del Castillo, 1986. p.203-220.

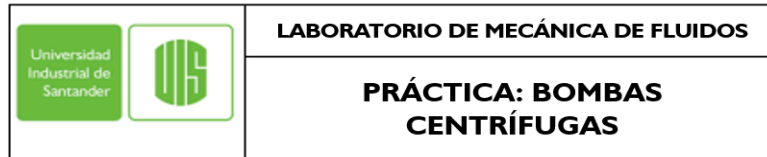
SANABRIA GUAUQUE, Cesar Augusto y SÁNCHEZ BARRERA, Ricardo. Diseño de un banco de pruebas para la evaluación de pérdidas de energía en un sistema de transporte de fluidos. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2004. 465p.

STERLING SIHI. Principios Básicos para el Diseño de Instalaciones de Bombas Centrífugas. 7 ed. 390p.

QUIROGA PINEDA, Anderson Gerardo. Construcción y montaje del banco de evaluación de pérdidas de energía en un sistema de transporte de fluidos para el laboratorio de transporte y aprovechamiento de fluidos adscrito a la escuela de ingeniería mecánica. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2010. 130p.

## **ANEXOS**

## ANEXO A. PRÁCTICA BOMBAS CENTRÍFUGAS



### 1. OBJETIVOS

- Realizar el muestreo gráfico de la curva característica de una bomba centrífuga en tiempo real a través del software LABVIEW.
- Hacer un análisis comparativo entre la curva real y la dada por el fabricante.
- Verificar el comportamiento de una bomba centrífuga al variar la velocidad de rotación.
- Estudiar el comportamiento de la potencia eléctrica consumida y la eficiencia global para una bomba centrífuga al variar el flujo impulsado.

### 2. MARCO TEÓRICO

- Curva característica de una bomba centrífuga.
- Punto de operación y punto de “shut off”.
- Definición de eficiencia.
- Potencia eléctrica.

Descripción de la instalación

### 3. EQUIPO NECESARIO

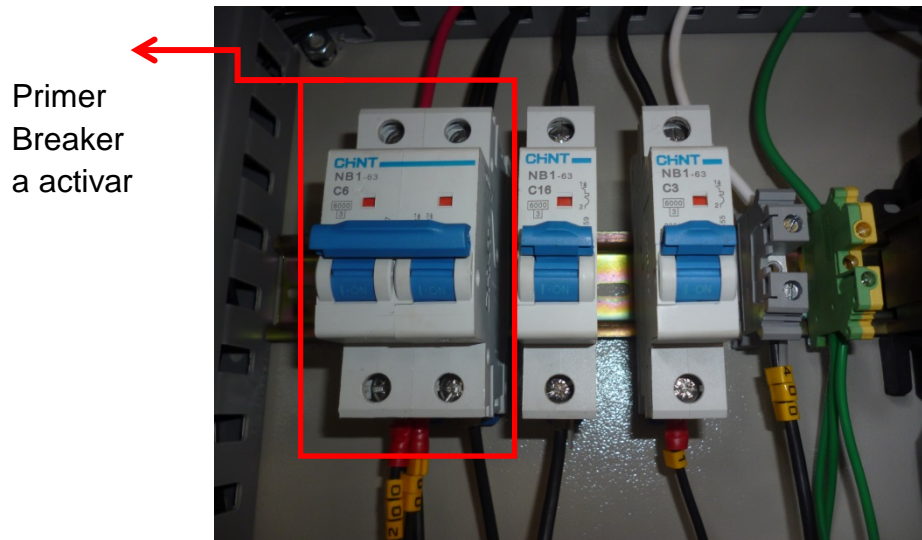
- Banco de caracterización de sistemas de transporte de líquidos.
- Pinza voltiamperimétrica (disponible para medición de potencia eléctrica).

### 4. PROCEDIMIENTO

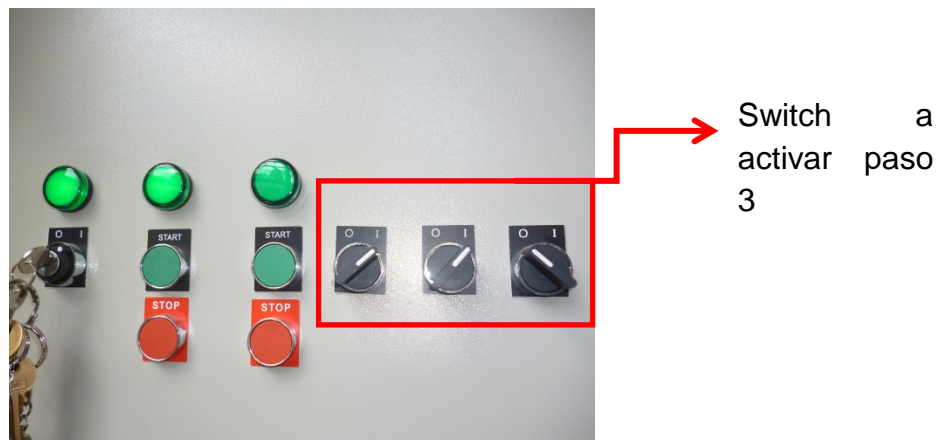
**NOTA:** en todo momento, las bombas deben tener la válvula de succión abierta.

## PARTE I. Caracterización Bomba I

1. Encienda el banco, para esto, active los breakers que se encuentran dentro del tablero de control en orden de izquierda a derecha según lo indica la figura a continuación.



2. Luego active el "switch" de llave que se encuentra en la puerta del tablero.
3. Encienda el PLC así como todos los instrumentos y la fuente de alimentación del tablero de control.



4. Conecte el cable Ethernet al PLC S7 1200 verificando que éste se encuentre en modo "RUN" (Led verde en la CPU del PLC), de lo contrario, ejecute el software Step 7 y active esta opción para el PLC.
5. En el computador, abra el fichero OPC client seguido del archivo de LABVIEW que contiene la plataforma de trabajo para la práctica.
6. Verifique que las válvulas de descarga y succión para la bomba que va a caracterizar se encuentran abiertas, así como las válvulas de conexión a los manómetros.



- 1) Válvula de Succión Bomba II
- 2) Válvula de Descarga Bomba II
- 3) Válvula de Descarga Bomba I

\*La Bomba I no dispone de válvula de succión.

7. Encienda la moto-bomba monofásica.  
- Varíe el flujo de 5 en 5 LPM desde máximo a mínimo a través de la válvula de compuerta que se encuentra en la descarga

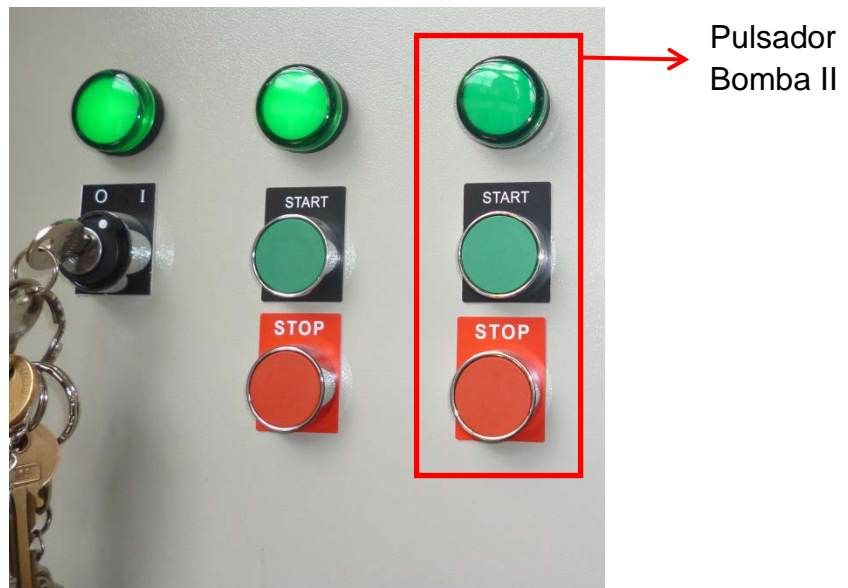


(Verifique esta lectura con la ayuda del sistema de monitoreo).

8. Tome los datos solicitados en la tabla II.
9. A medida que se varía el flujo, la gráfica de LABVIEW se va construyendo, cuando ésta llegue al punto de caudal cero, detenga el muestreo en el archivo guarde la gráfica, y abra el archivo Excel que contiene los datos tomados para la construcción de la curva característica (Guarde esos datos en la tabla I).
10. Apague la moto-bomba.

## PARTE II. Caracterización Bomba II

1. Encienda el variador de frecuencia. Para eso active el pulsador que corresponde a la Bomba II

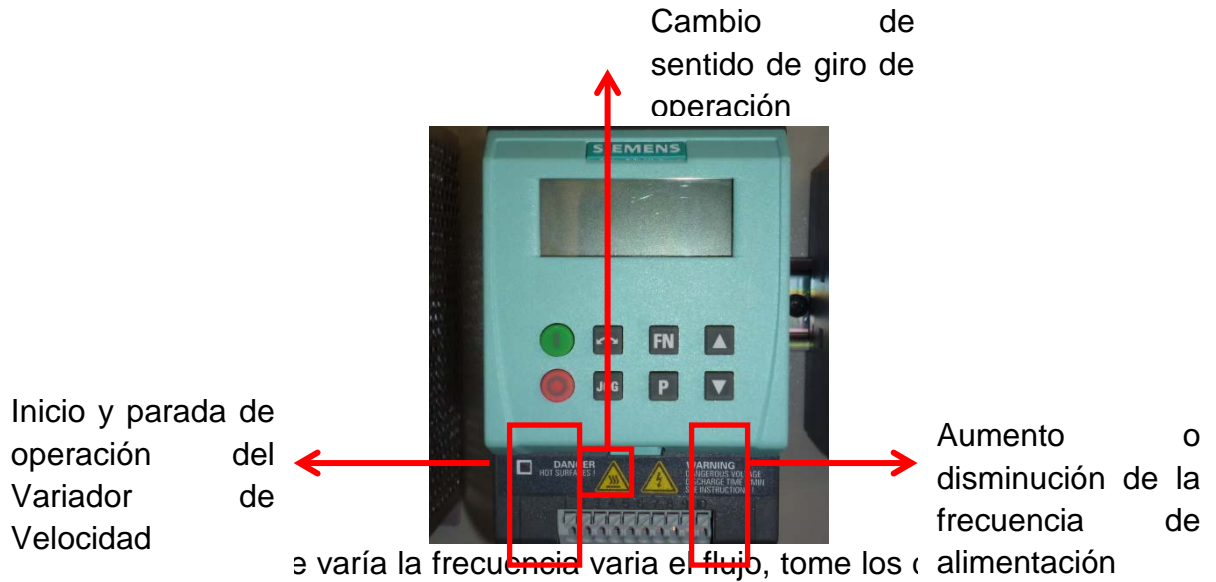


2. Configure el variador de acuerdo a la lista de instrucciones que se encuentra en la puerta del tablero de control.
  - Repita el procedimiento realizado en la parte 1 ente los pasos 1 y 6.
3. Active la bomba dando inicio al variador.
  - \*Verifique que el sentido de rotación del eje del motor sea el indicado (sentido de las manecillas del reloj viendo desde el motor a la bomba); de lo contrario haga uso del botón cambio en el sentido de giro ubicado en el variador.
4. Varié el flujo de 5 en 5 LPM desde máximo a mínimo a través de la válvula de compuerta que se encuentra en la descarga.
5. Tome los datos solicitados en la tabla de datos Bomba II
6. A medida que se varía el flujo, la gráfica de LABVIEW se va construyendo, cuando ésta llegue al punto de caudal cero, detenga el muestreo en el archivo guarde la gráfica, y abra el archivo Excel que contiene los datos tomados para la construcción de la curva característica (Guarde esos datos en la tabla I).
7. Apague el variador de velocidad; active el pulsador de apagado de la bomba II.

### PARTE III Regulación de Flujo usando Variador de Frecuencia

1. Repita los pasos 1 a 3 para la parte II de la práctica.

- Varié la frecuencia de la alimentación del motor trifásico de 5 en 5 [Hz] hasta llegar a 45 [Hz].



la tabla II.

- Cuando se llegue al punto de caudal cero, detenga el muestreo en el archivo de Labview guarde la gráfica, y abra el archivo Excel que contiene los datos tomados para la construcción de la curva característica (Guarde esos datos en la tabla I).
- Apague el variador de velocidad; active el pulsador de apagado de la bomba II.

## 5. TABLAS Y CÁLCULOS

Gráfica teórica moto-bomba monofásica

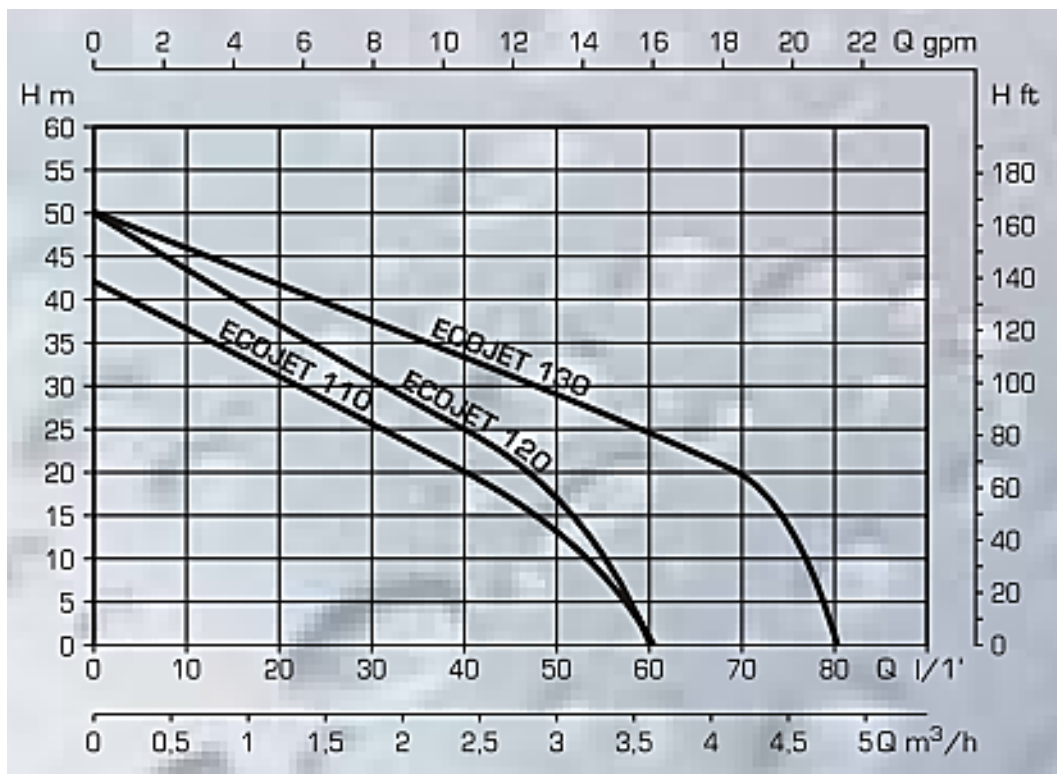


Tabla 1.

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS		
	Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos	
Fecha:		Bomba Activa:
Caudal [lpm]	Altura Bomba [Kpa]	Potencia Hidraulica [Kw]

Tabla 2.

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS							
	Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos						
Fecha:		Motor Monofasico	Motor Trifasico				Eficiencia %
Caudal [lpm]	Potencia Hidraulica [Kw]	Potencia Electrica [Kw]	Frecuencia [Hz]	Potencia Linea 1 [Kw]	Potencia Linea 2 [Kw]	Potencia Linea 3 [Kw]	

## Ecuaciones:

Potencia hidráulica=Presión [Pa] x Caudal [m<sup>3</sup>/s] [W]

Potencia eléctrica= voltaje [V] x corriente [A] x Cos(phi) [W]

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### PARTE I

- Haciendo uso de los datos tomados en el archivo Excel (Tabla I) construya la curva característica de la Bomba a partir de la regresión para un polinomio que mejor se adapte a la tendencia de los datos obtenidos.
- ¿Sigue la curva característica un comportamiento polinomial de orden 2 aproximado al de la curva de tendencia determinada o se ajusta mejor a otro tipo de modelo (logarítmico, exponencial, polinómico...)? Justifique.
- Compare la curva obtenida con la proporcionada por el fabricante. Explique a que se deben las diferencias.
- Haciendo uso de los datos tomados en la tabla II construya la curva Potencia Eléctrica vs Caudal; Eficiencia Global Vs Caudal.
- ¿Satisfacen las curvas Potencia Eléctrica vs Caudal, Eficiencia Global Vs Caudal lo esperado por la teoría?
- ¿En qué punto se encuentra la máxima eficiencia global? ¿Qué dice la teoría al respecto? ¿es el valor de eficiencia global un valor aceptable considerando el flujo impulsado?
- ¿Qué pasaría si cambiamos el motor de la bomba por uno de 5 o 10 [HP]?
- Enuncie las posibles fuentes de error que usted considere influyen determinantemente en la experiencia realizada, y explique cuál es la influencia de cada una.

## PARTE II

- Haciendo uso de los datos tomados en el archivo Excel (Tabla I) construya la curva característica de la Bomba a partir de la regresión para un polinomio que mejor se adapte a la tendencia de los datos obtenidos.
- ¿Sigue la curva característica un comportamiento polinomial de orden 2 aproximado al de la curva de tendencia determinada o se ajusta mejor a otro tipo de modelo (logarítmico, exponencial, polinómico...)? Justifique.
- Haciendo uso de las leyes de semejanza para velocidad variable y a partir de los datos obtenidos en la tabla I, construya la curva característica de la bomba para velocidad de giro de 3600 rpm. Compare esa curva con la obtenida para la parte I de la práctica.
- Enuncie las posibles fuentes de error que usted considere influyen determinantemente en la experiencia realizada, y explique cuál es la influencia de cada una.



## PARTE III

- Haciendo uso de los datos tomados en el archivo Excel (Tabla I) construya la curva característica de la Bomba a partir de la regresión para un polinomio que mejor se adapte a la tendencia de los datos obtenidos.
- Explique la curva de la moto-bomba trifásica cuando se varía su velocidad manteniendo el sistema constante.
- Haciendo uso de las leyes de semejanza para velocidad variable y a partir de los datos obtenidos en la tabla I parte II, construya la familia de curvas características para la bomba centrífuga operando a diferente velocidad de flujo. Represente en una misma grafica junto con la obtenida por los datos tabla I parte III. ¿Qué representa esta grafica?
- Enuncie las posibles fuentes de error que usted considere influyen determinantemente en la experiencia realizada, y explique cuál es la influencia de cada una.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- FOX, Robert W., y MCDONALD, Alan T. Introducción a la mecánica de fluidos. 2 ed. México: McGraw-Hill, 1995.
- MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. 2 ed. Madrid: Ediciones del Castillo, 1986.
- STERLING SIHI. Principios Básicos para el Diseño de Instalaciones de Bombas Centrífugas. 7 ed.

## ANEXO B. PRÁCTICA CONFIGURACIÓN DE BOMBAS

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS
	<b>PRÁCTICA: BOMBAS SERIE Y PARALELO</b>

### 1. OBJETIVOS

- Realizar el muestreo gráfico de la curva característica de una configuración de bombas centrífugas en tiempo real a través del software LABVIEW.
- Hacer un análisis comparativo entre las curvas de operación reales y las teóricas.
- Verificar el comportamiento de una configuración serie y paralelo desde el punto de vista de presión y flujo.

### 2. MARCO TEÓRICO

- Configuración serie y paralelo de bombas centrífugas
- Curva característica de una configuración de bombas centrífugas.

### 3. EQUIPO NECESARIO

- Banco de caracterización de sistemas de transporte de líquidos.
- Pinza voltiamperimétrica (disponible para medición de potencia eléctrica).

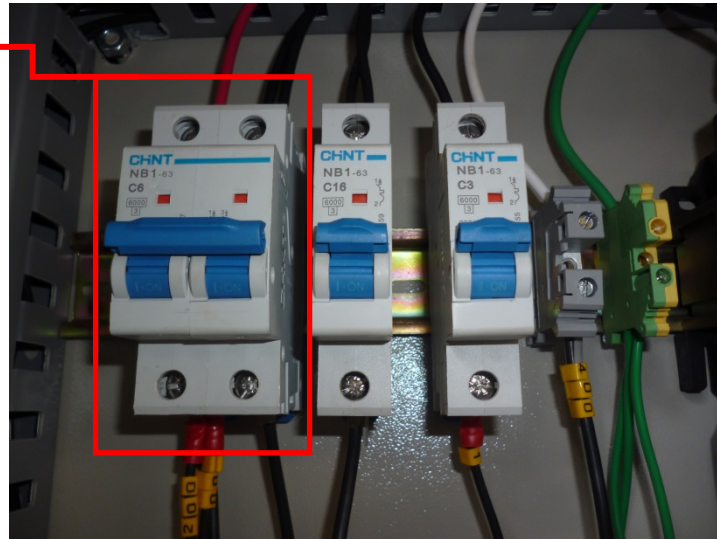
### 4. PROCEDIMIENTO

**NOTA:** en todo momento, las bombas deben tener la válvula de succión abierta.

PARTE 1. Bombas Serie

1. Encienda el banco, para esto, active los breakers que se encuentran dentro del tablero de control en orden de izquierda a derecha según lo indica la figura a continuación.

Primer  
Breaker  
a activar



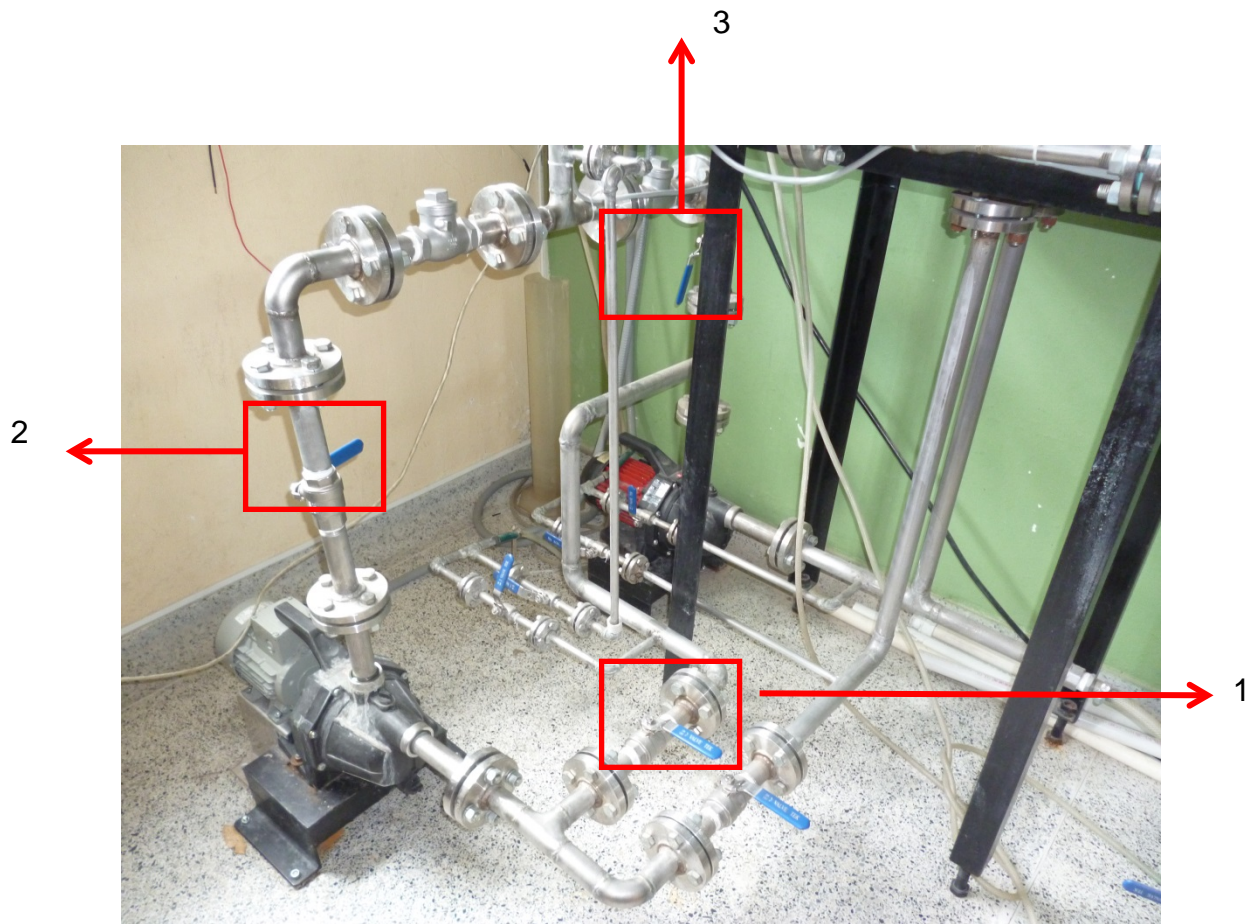
2. Luego active el “switch” de llave que se encuentra en la puerta del tablero.
3. Encienda el PLC así como todos los instrumentos y la fuente de alimentación del tablero de control.



Switch a  
activar  
paso  
3

4. Conecte el cable Ethernet al PLC S7 1200 verificando que éste se encuentre en modo “RUN” (Led verde en la CPU del PLC), de lo contrario, ejecute el software Step 7 y active esta opción para el PLC.

5. En el computador, abra el fichero OPC client seguido del archivo de LABVIEW que contiene la plataforma de trabajo para la práctica.
6. Habilite y deshabilite las válvulas correspondientes para una configuración en serie. Se recomienda que la moto-bomba I descargue en la moto-bomba II con el fin de observar mejor el fenómeno. Para esto active las válvulas presentadas en la imagen a continuación siguiendo el orden descrito.

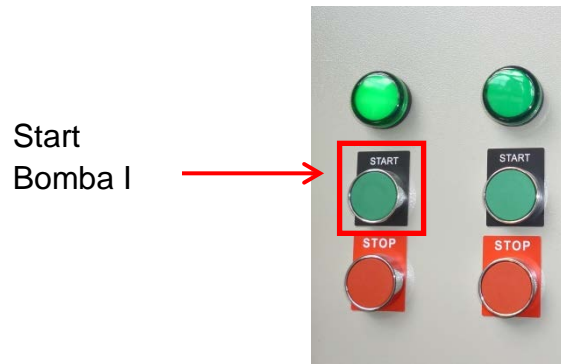


1) Válvula que descarga I en II

2) Válvula de descarga conjunto de bombas

\*verifique que la válvula de descarga de la bomba II al sistema (3) se encuentre cerrada.

7. Encienda el variador de frecuencia. Para eso active el pulsador que corresponde a la Bomba II. Configure el variador de acuerdo a la lista de instrucciones que se encuentra en la puerta del tablero de control.
8. Active el pulsador que corresponde a la puesta en marcha de la bomba I



9. Active la bomba II presionando el botón marcha del variador de frecuencia.  
\*Verifique que el sentido de rotación del eje del motor sea el indicado (sentido de las manecillas del reloj viendo desde el motor a la bomba); de lo contrario haga uso del botón cambio en el sentido de giro ubicado en el variador.

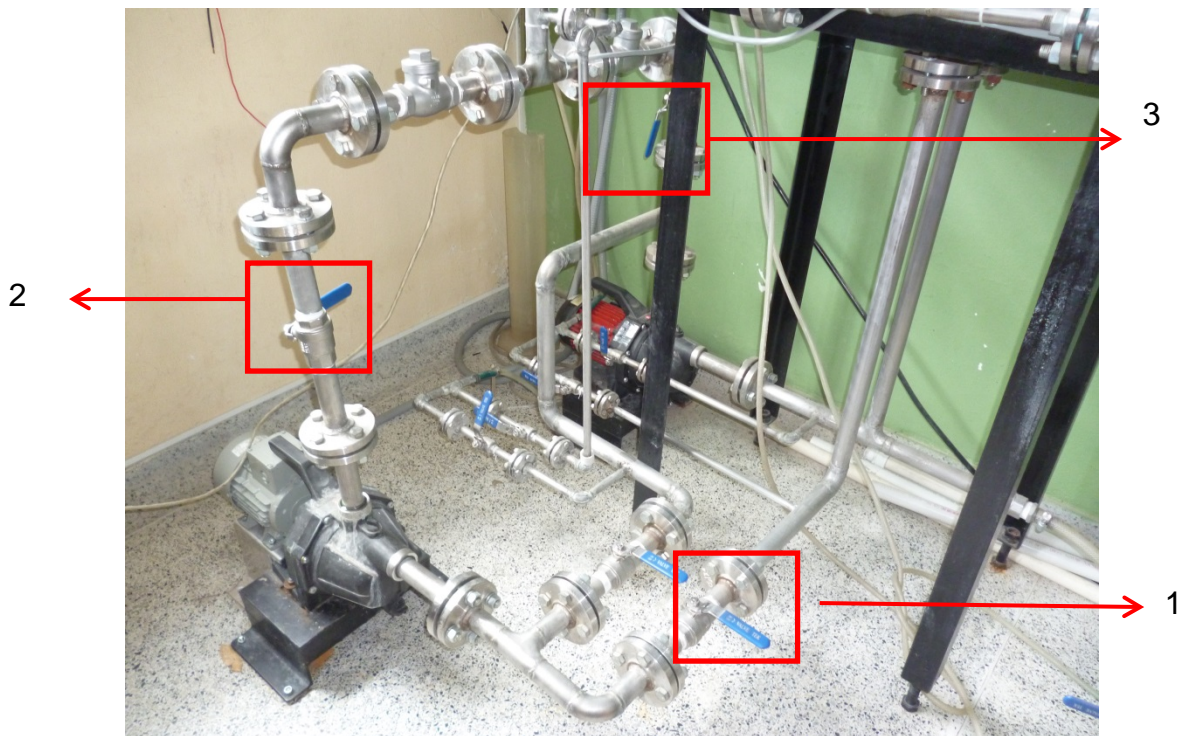


10. Ajuste el valor de la frecuencia en 45 Hz.
11. Ponga en marcha la simulación de LABVIEW.
12. Varié el flujo de 5 en 5 LPM desde máximo a mínimo a través de la válvula de compuerta que se encuentra en la descarga.

13. Tome los datos solicitados en la tabla II.
14. Cuando llegue a flujo cero, detenga la simulación de LABVIEW. Guarde la gráfica, y abra el archivo Excel que contiene los datos tomados para la construcción de la curva característica (Guarde esos datos en la tabla I).
15. Apague los equipos para esto active el botón de parada del variador, seguido de la activación de los pulsadores de STOP correspondientes a la Bomba II y la Bomba I.

## PARTE 2. Bombas Paralelo

1. Repita el procedimiento de la parte 1 en los pasos 1 a 5
2. Habilite y deshabilite las válvulas correspondientes para una configuración en serie.
3. Para esto active las válvulas presentadas en la imagen a continuación siguiendo el orden descrito.



- 1) Válvula de succión Bomba II
- 2) Válvula de descarga Bomba II
- 3) Válvula de descarga Bomba I

4. Repita los pasos 7 a 15 de la parte I.

## 5. TABLAS Y CÁLCULOS

Tabla 1.

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS		
	Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos	
Fecha:		Bomba Activa:
Caudal [lpm]	Altura Bomba [Kpa]	Potencia Hidraulica [Kw]

Tabla 2.





- ¿En qué aplicaciones se podrían usar bombas en serie? ¿En cuales es recomendable usar configuraciones paralelo?
- ¿Qué condiciones son necesarias para configurar un grupo de bombas en paralelo? Explique gráficamente.
- ¿Qué función cumplen las válvulas Check ubicadas en la descarga de cada una de las bombas I y II?, Explique
- ¿Qué sucede con la eficiencia al acoplar bombas en serie con respecto a la eficiencia de una bomba en solitario? ¿De qué forma podría justificarse este efecto?
- Enuncie las posibles fuentes de error que usted considere influyen determinadamente en la experiencia realizada, y explique cuál es la influencia de cada una.

## **7. BIBLIOGRAFIA**

- STERLING SIHI. Principios Básicos para el Diseño de Instalaciones de Bombas Centrífugas. 7 ed.
- MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. 2 ed. Madrid: Ediciones del Castillo, 1986.
- FOX, Robert W., y MCDONALD, Alan T. Introducción a la mecánica de fluidos. 2 ed. México: McGraw-Hill, 1995.
- FERNANDEZ DIEZ, Pedro. Bombas Centrífugas y Volumétricas. COMUNIDAD AUTÓNOMA DE CANTABRIA: Universidad de Cantabria.

## ANEXO C. PRÁCTICA PÉRDIDAS DE CARGA

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS
	<b>PRÁCTICA: PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS</b>

### 1. OBJETIVOS

- Predecir y cuantificar pérdidas de carga a través del análisis matemático de la tubería y sus componentes.
- Comprobar la validez de las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White como modelo matemático para describir el fenómeno de pérdidas de energía en tuberías.
- Verificar los principios que gobiernan el comportamiento de líneas de tuberías en serie.
- Verificar los principios que gobiernan el comportamiento de líneas de tuberías en paralelo.

### 2. MARCO TEÓRICO

- Constantes de pérdidas en accesorios y tuberías.
- Curva característica de una red.
- Análisis de flujo en tuberías de Darcy-Weishback.

### 3. EQUIPO NECESARIO

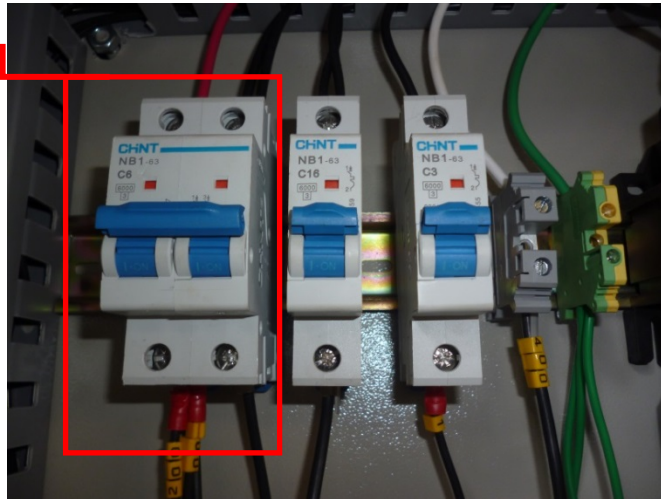
- Banco de caracterización de sistemas de transporte de líquidos.

### 4. PROCEDIMIENTO

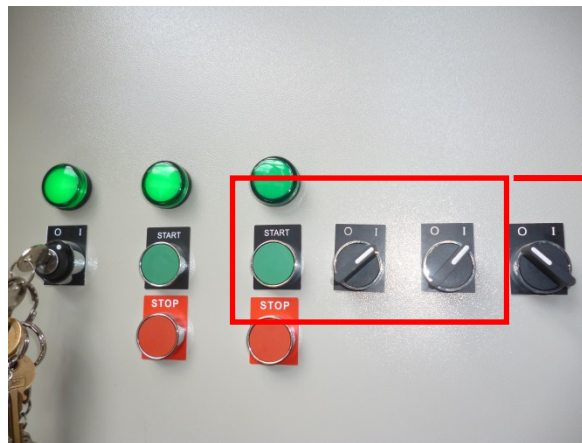
**NOTA:** en todo momento, las bombas deben tener la válvula de succión abierta.

1. Encienda el banco, para esto, active los breakers que se encuentran dentro del tablero de control en orden de izquierda a derecha según lo indica la figura a continuación.

Primer  
Breaker  
a activar



2. Luego active el “switch” de llave que se encuentra en la puerta del tablero.
3. Encienda el PLC así como todos los instrumentos y la fuente de alimentación del tablero de control.



Switch a  
activar paso  
3

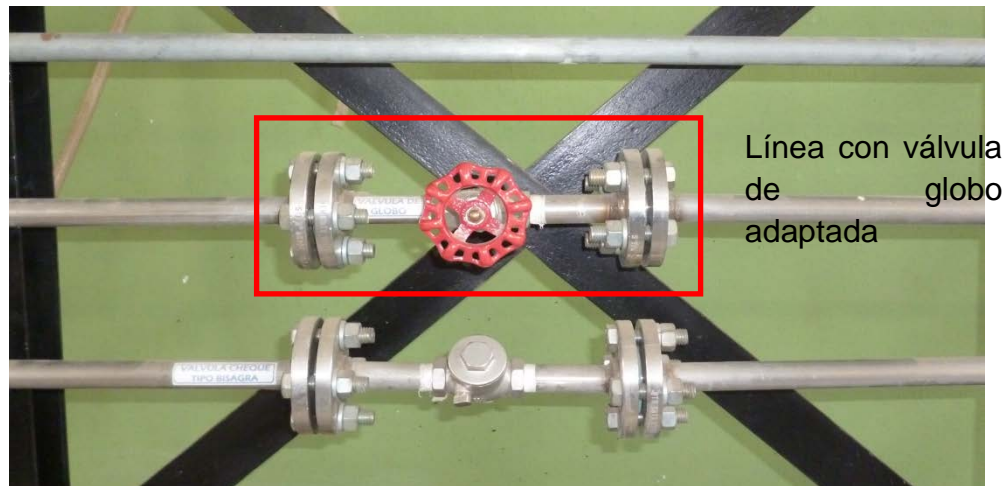
4. Conecte el cable Ethernet al PLC S7 1200 verificando que éste se encuentre en modo “RUN” (Led verde en la CPU del PLC), de lo contrario, ejecute el software Step 7 y active esta opción para el PLC.

5. En el computador, abra el fichero OPC client seguido del archivo de LABVIEW que contiene la plataforma de trabajo para la práctica.
6. Verifique que las válvulas de succión y descarga para la Bomba I se encuentren abiertas, así como las válvulas de conexión a los manómetros.

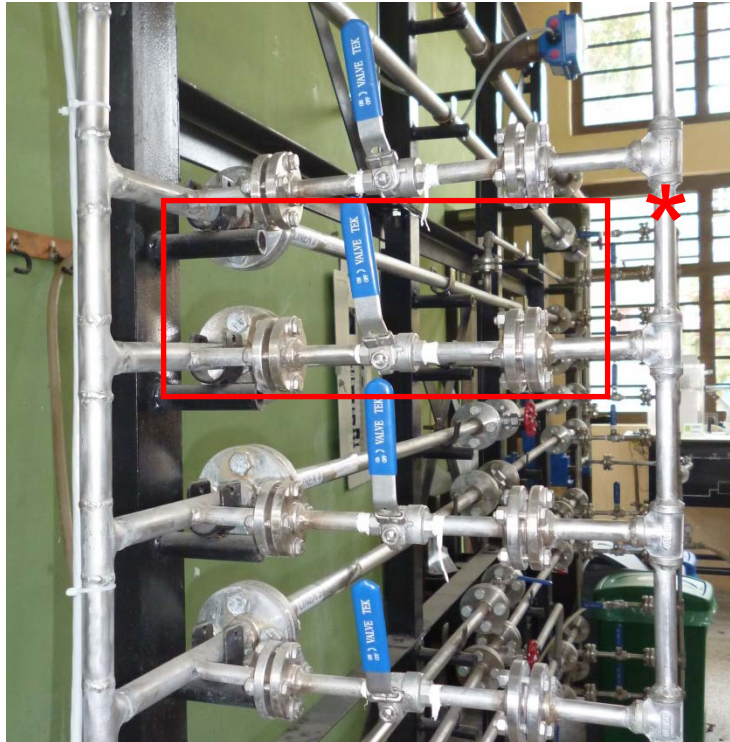
Válvula de  
descarga  
Bomba I



7. Active la línea o líneas a caracterizar para esto si la línea contiene alguna válvula verifique que esta se encuentre totalmente abierta.



8. Active la medición de la presión con el manómetro diferencial; como lo indica la figura a continuación active la válvula que corresponde a la línea a caracterizar así como las válvulas de conexión al manómetro diferencial.



\*Válvula correspondiente a cada línea de la red de tuberías útil para la medición de presión diferencial; ubicada en cada uno de los extremos de la tubería.

9. Varíe el flujo de 5 en 5 LPM desde máximo a mínimo a través de la válvula de compuerta que se encuentra en la descarga



(Verifique esta lectura con la ayuda del sistema de monitoreo).

10. A medida que se varía el flujo, la gráfica de LABVIEW se va construyendo, cuando ésta llegue al punto de caudal cero, detenga el muestreo en el archivo guarde la gráfica, y abra el archivo Excel que contiene los datos tomados para la construcción de la curva característica (Guarde esos datos en la tabla I).


11. Apague la moto-bomba.

## 5. TABLAS Y CÁLCULOS

Tabla 1.

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS			
		Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos	
Fecha:		Linea(s) Activa(s):	
Las lineas activas se encuentran en:		Paralelo	Serie
Densidad del Agua:		Viscosidad del Agua:	
Caudal [lpm]		Presion diferencial [Kpa]	

Tabla 2.

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS					
		Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos			
Fecha:	Linea(s) Activa(s):		Diametro Interior Tuberia [mm]		Longitud [m]
Las lineas activas se encuentran en:		Paralelo	Serie		
Densidad del Agua:	Viscosidad del Agua:				
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Presion diferencial [m]		Numero de Reynols	Factor de Fricción	Hf perdidas Teorico [m]
					% Error

Dónde:

Q caudal impulsado en  $m^3/s$

D diámetro interior de la tubería en m

v viscosidad cinemática del fluido en  $m^2/s = -$

Análisis de flujo en tuberías de Darcy-Weishback.

Dónde:

L longitud tubería en m

Q caudal en  $m^3/s$

D diámetro interior de la tubería en m

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Elabore una curva de la forma  $P=K*Q^2$  a partir de los datos obtenidos en la tabla 1.
- Complete la tabla 2 haciendo uso de la teoría de pérdidas de flujo en tuberías presente en la bibliografía.
- Compare las gráficas obtenidas experimentalmente y las teóricas elaboradas por usted. ¿A qué se deben las diferencias?
- ¿Qué comportamiento muestra la caída de presión al incrementar el cuadrado de la velocidad del fluido en la tubería?, ¿Se ajusta este comportamiento a un

modelo lineal (pasa la recta por el origen)?, ¿Era esto previsible desde el punto de vista teórico? Explique.

- ¿De qué forma afecta la disposición de válvulas y accesorios a una línea de tubería? Explique y argumente haciendo uso de la teoría.
- ¿Qué sucede si cambiamos el motor de las motobombas por uno de 5 [HP]?
- Describa gráficamente la variación de la constante de pérdidas K en función de las restricciones en el sistema, cuando se incrementan las pérdidas, ¿K es mayor o menor?
- Según el comportamiento observado en el paralelo estudiado, ¿Qué cree usted debe suceder al paralelo si se le adiciona una tercera línea, manteniendo constantes la presión manométrica a la entrada del paralelo y QT? Justifique.
- Según el comportamiento observado en el paralelo estudiado, ¿Qué cree usted debe suceder al paralelo si se le adicionan varias líneas más, y deseo mantener constante el diferencial de presión? Justifique.
- Enuncie las posibles fuentes de error que usted considere influyen determinantemente en la experiencia realizada, y explique cuál es la influencia de cada una.

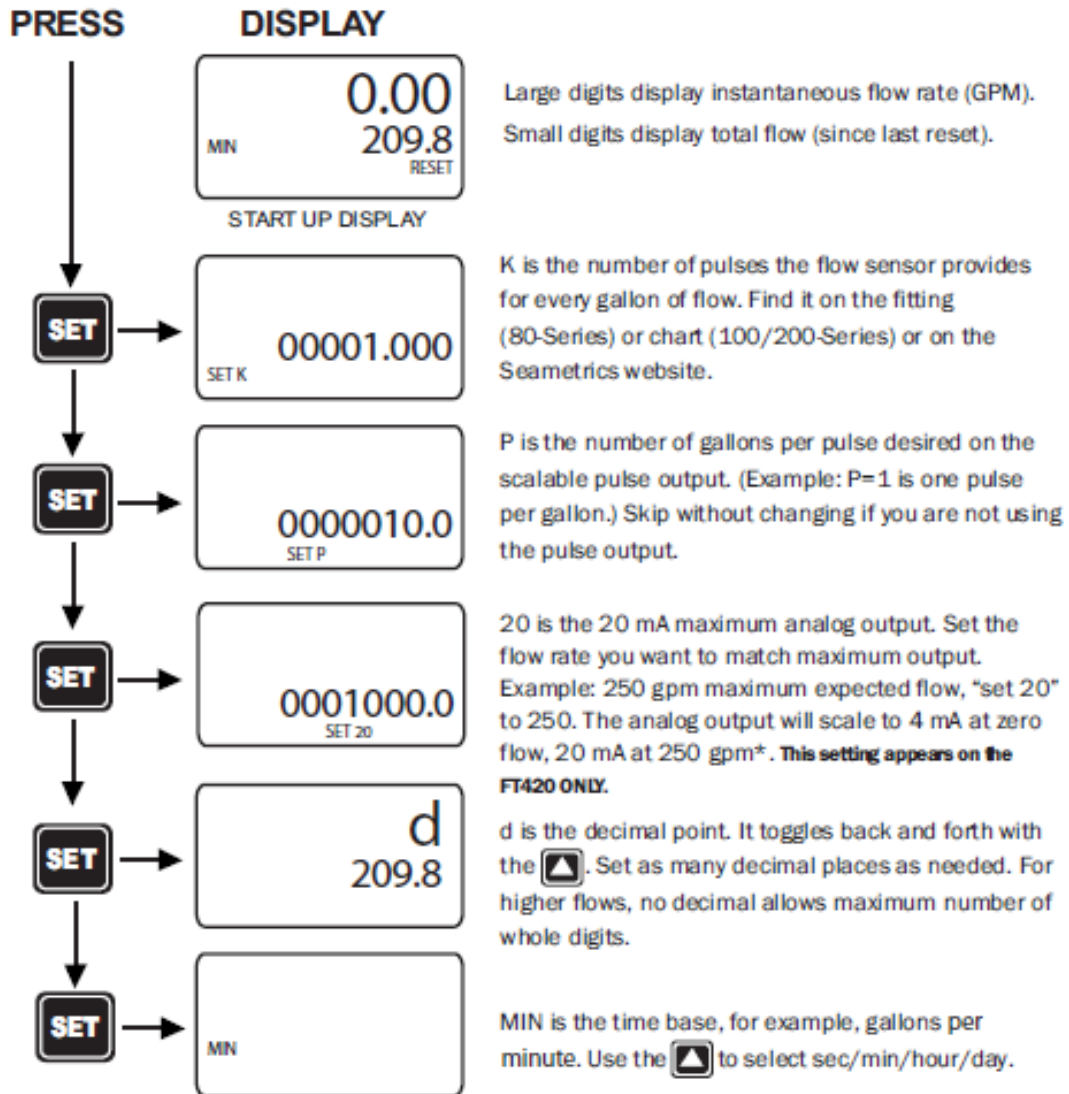
## 7. BIBLIOGRAFIA

- STERLING SIHI. Principios Básicos para el Diseño de Instalaciones de Bombas Centrífugas. 7 ed.
- MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. 2 ed. Madrid: Ediciones del Castillo, 1986.
- FOX, Robert W., y MCDONALD, Alan T. Introducción a la mecánica de fluidos. 2 ed. México: McGraw-Hill, 1995.
- CRANE. Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Mc Graw Hill, México, 1999.

## ANEXO D. CONFIGURACIÓN DEL FLUJÓMETRO

### QUICK SETTINGS OVERVIEW

See following page for step-by-step instructions on changing these settings  
Pass through all settings and return to original display to save settings.



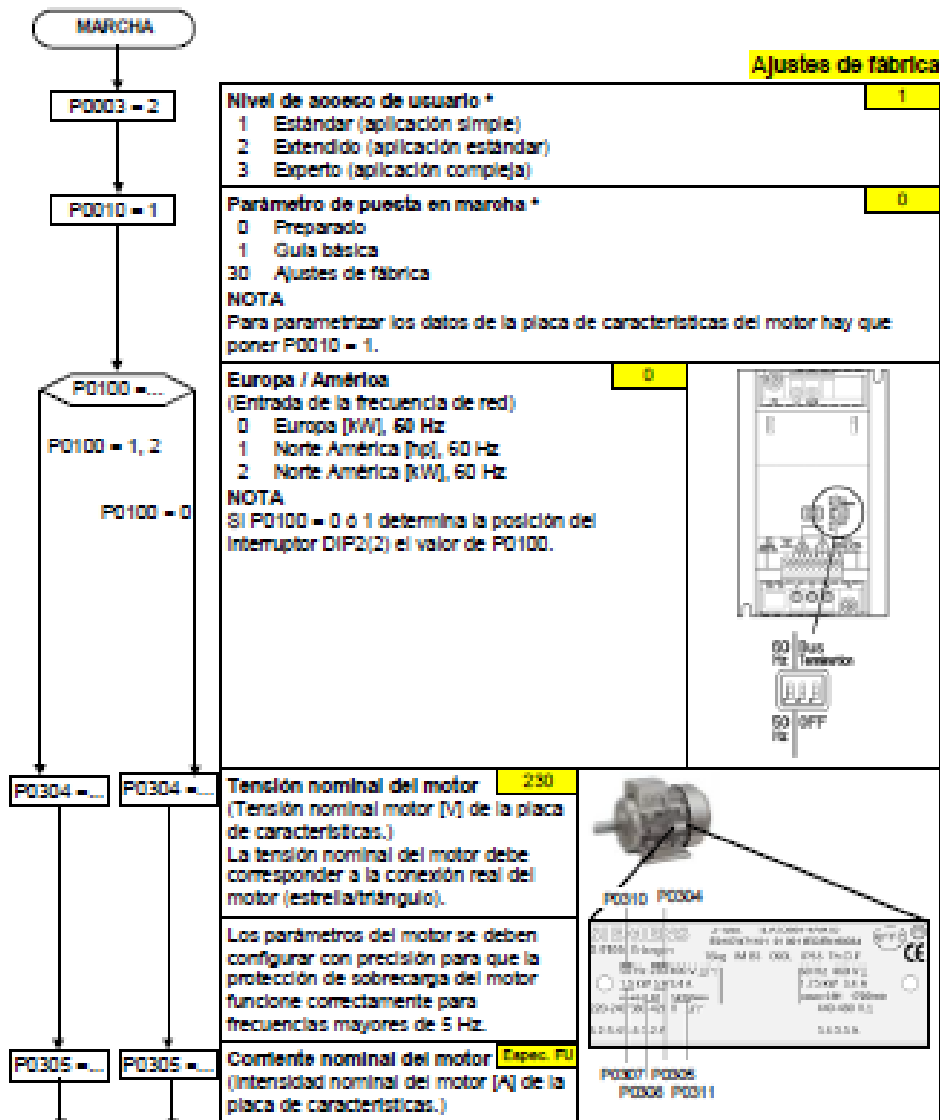
\*NOTE: Use the up arrow key to reach your desired digit. Then press the left arrow key to move to the next digit. Repeat the process until the entire number is entered.

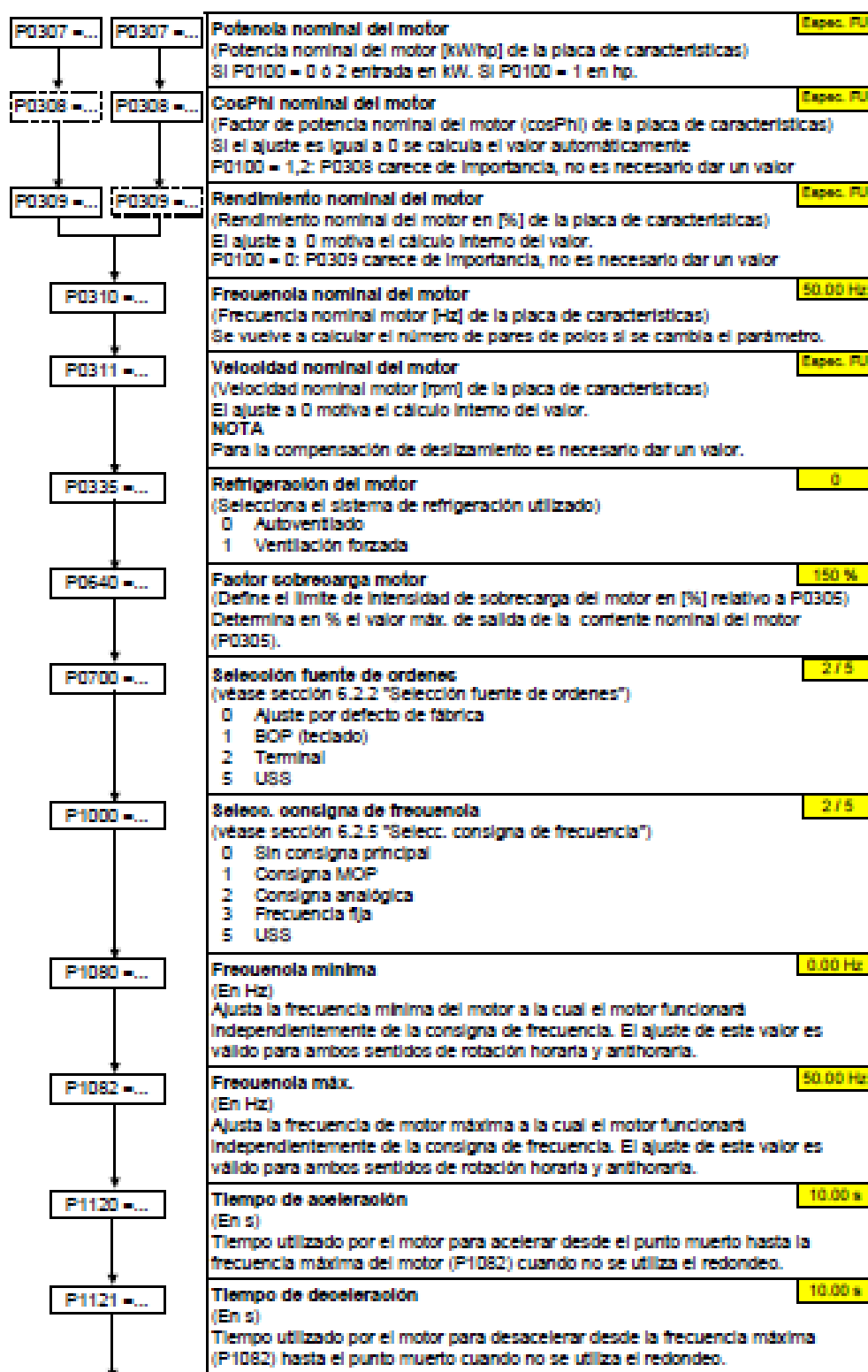
## ANEXO E. CONFIGURACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

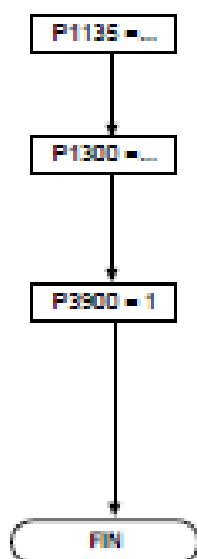
### 6.1 Puesta en servicio rápida

Con la puesta en servicio rápida se adapta el convertidor al motor y se ajustan parámetros importantes para las exigencias tecnológicas. La puesta en servicio rápida no es obligatoria si los datos del motor almacenados en el convertidor (motor de Siemens de 4 polos 1LA, conexión en estrella  $\Delta$  Espec. FU) coinciden con los de la placa de características.

Los parámetros marcados con \* ofrecen más posibilidades de ajuste de las que se mencionan aquí. Para más detalles consulte la lista de parámetros.








<b>Tiempo deceleración OFF3</b> (En s) Define el tiempo de deceleración desde la frecuencia máxima hasta el punto muerto para una orden OFF3.	5.00 s
<b>Modo de control</b> (Entrada del modo de control deseado) 0 V/f con característ. lineal 2 V/f con característ. parabólica 3 V/f con característ. programable	0
<b>Fin de la puesta en servicio ráp (Comienza cálculo motor)</b> 0 Sin puesta en marcha rápida (sin cálculos de motor) 1 Inicio puesta en marcha rápida con borrado de ajustes de fábrica 2 Inicio puesta en marcha rápida 3 Inicio puesta en marcha rápida sólo para los datos del motor <b>NOTA:</b> Para P3900 = 1,2,3 → el P0340 se pone internamente = 1 y se calculan los datos correspondientes (véase P0340 en la lista de parámetros).	0
<b>Fin de la puesta en servicio ráp / ajuste del accionamiento.</b> En el caso que tenga que parametrizar otras funciones en el convertidor utilice las instrucciones "Puesta en servicio según aplicación". Se recomienda para accionamientos dinámicos.	

## ANEXO F. Datos obtenidos experimentalmente en las prácticas

Prueba Bomba 1 regulación con válvula en la descarga.

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS		
		Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos
Fecha: 14 Julio de 2013	Bomba Activa: Bomba 1	
Caudal [lpm]	Altura Bomba [Kpa]	Potencia Hidráulica [Kw]
43.736	232.384	0.1662
43.731	227.140	0.1624
43.711	232.936	0.1665
43.726	218.752	0.1564
43.591	226.855	0.1617
43.601	226.232	0.1613
43.621	228.729	0.1631
43.626	213.544	0.1523
43.736	223.772	0.1600
43.941	234.174	0.1682
43.941	220.461	0.1584
43.956	221.797	0.1594
43.721	221.016	0.1580
43.531	226.627	0.1613
43.282	215.360	0.1524
43.057	215.674	0.1518
43.027	219.319	0.1543
42.927	220.899	0.1550
42.818	213.090	0.1492
41.924	217.648	0.1492
41.175	231.454	0.1558
40.706	204.955	0.1364
40.706	227.455	0.1514
40.467	226.860	0.1501
40.601	226.424	0.1503
40.462	213.575	0.1413
40.462	225.439	0.1491
40.372	214.711	0.1417
40.247	227.203	0.1495
40.277	240.617	0.1585
40.671	224.070	0.1490
40.137	226.414	0.1486
39.788	222.752	0.1449
39.588	227.236	0.1471
39.438	225.278	0.1453
39.453	219.780	0.1418
39.443	219.717	0.1417
39.463	232.118	0.1498
39.364	224.000	0.1442
39.349	220.765	0.1420
39.234	221.344	0.1420
39.114	215.274	0.1377
39.124	209.819	0.1342
39.114	228.488	0.1461
39.229	222.386	0.1426
39.359	227.968	0.1467
39.334	219.611	0.1412
39.349	232.175	0.1494
39.339	220.007	0.1415
40.017	217.274	0.1422
41.140	225.949	0.1520
41.814	228.834	0.1564
41.809	232.998	0.1593
41.794	217.212	0.1484
41.824	223.843	0.1531
41.799	223.390	0.1527
41.919	220.283	0.1510


42.254	222.837	0.1539
42.713	229.819	0.1605
42.733	231.096	0.1615
42.273	239.337	0.1654
41.694	239.176	0.1630
41.305	230.064	0.1554
41.240	231.708	0.1562
41.250	224.922	0.1517
41.041	230.079	0.1544
40.916	236.928	0.1585
41.120	235.616	0.1584
41.031	240.963	0.1617
40.227	238.384	0.1568
39.568	237.884	0.1539
39.453	232.007	0.1497
39.349	241.714	0.1555
39.124	250.451	0.1602
39.009	252.558	0.1611
37.302	259.549	0.1583
36.209	266.161	0.1576
35.440	242.832	0.1407
35.181	270.910	0.1558
35.061	280.037	0.1605
35.196	262.688	0.1512
35.191	255.116	0.1468
35.201	265.996	0.1531
35.186	263.837	0.1518
35.196	290.434	0.1671
35.296	271.180	0.1565
35.306	270.365	0.1561
35.420	265.871	0.1540
35.425	260.462	0.1509
35.206	247.596	0.1425
35.201	255.511	0.1471
35.191	262.552	0.1511
35.201	278.715	0.1604
35.196	274.245	0.1578
35.286	266.132	0.1535
35.311	278.635	0.1609
34.527	279.291	0.1577

33.938	273.632	0.1518
33.728	274.982	0.1516
33.404	276.196	0.1508
33.359	279.439	0.1524
33.284	280.487	0.1526
33.294	282.080	0.1536
33.159	267.598	0.1451
33.050	274.745	0.1485
32.960	281.805	0.1519
32.945	267.067	0.1439
32.940	276.485	0.1489
32.940	282.902	0.1524
32.935	278.463	0.1499
33.040	293.020	0.1583
33.055	292.450	0.1581
33.164	273.021	0.1480
32.925	269.689	0.1452
33.055	279.155	0.1509
32.605	292.448	0.1559
31.797	286.588	0.1490
31.597	300.017	0.1550
31.477	306.842	0.1579
31.357	301.068	0.1544
31.367	295.752	0.1517
31.138	293.529	0.1494
31.462	280.186	0.1441
31.582	289.517	0.1495
31.482	291.731	0.1502
31.233	319.861	0.1633
30.918	294.432	0.1488
30.120	321.909	0.1585
29.790	308.804	0.1504
29.461	313.299	0.1509
29.211	282.935	0.1351
29.166	290.875	0.1387
29.116	290.728	0.1384
28.992	312.742	0.1482
28.782	290.118	0.1365
28.927	303.249	0.1434
28.892	302.003	0.1427

29.002	311.720	0.1478
28.882	310.478	0.1466
29.002	333.773	0.1583
27.908	304.419	0.1389
27.105	327.062	0.1449
26.775	326.416	0.1429
26.661	329.059	0.1434
26.546	332.811	0.1444
25.872	321.010	0.1358
25.313	317.648	0.1315
24.969	354.123	0.1446
24.754	328.929	0.1331
24.739	331.138	0.1339
24.634	330.887	0.1333
24.634	345.101	0.1390
24.644	329.170	0.1326
24.285	388.289	0.1542
22.129	384.302	0.1390
21.025	384.958	0.1323
20.262	375.999	0.1246
19.922	378.387	0.1233
19.813	403.354	0.1307
19.713	369.794	0.1192
19.593	390.183	0.1250
19.593	367.842	0.1178
19.598	376.066	0.1205
19.573	379.385	0.1214
19.603	379.134	0.1215
19.568	379.998	0.1216
19.608	370.765	0.1189
19.598	361.835	0.1159
19.603	383.856	0.1230
19.588	383.223	0.1227
18.699	448.784	0.1372
16.997	413.273	0.1149

16.089	440.733	0.1159
15.670	438.792	0.1124
15.425	419.230	0.1057
15.320	438.700	0.1099
15.121	425.588	0.1052
15.016	433.204	0.1064
14.981	425.554	0.1042
14.871	426.751	0.1038
15.101	427.893	0.1056
15.106	429.893	0.1062
15.191	436.545	0.1084
15.196	424.878	0.1056
15.325	420.282	0.1053
15.325	447.070	0.1120
12.860	471.006	0.0990
5.752	498.201	0.0469
5.867	500.433	0.0480
5.892	503.681	0.0485
5.862	477.604	0.0458
5.882	501.951	0.0483
5.897	521.320	0.0503
5.892	495.996	0.0478
2.752	541.259	0.0244
2.612	498.921	0.0213
2.528	515.626	0.0213
2.533	516.339	0.0214
2.408	524.529	0.0206
2.403	519.450	0.0204
2.398	542.077	0.0213
0.501	552.382	0.0045
0.506	555.543	0.0046
0.476	536.802	0.0042
0.501	552.023	0.0045
0.496	558.283	0.0045

Prueba Bomba 2 regulación con válvula en la descarga.

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS		
		
Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos		
Fecha: 14 Julio de 2013		Bomba Activa: Bomba 2
Caudal [lpm]	Altura Bomba [Kpa]	Potencia Hidráulica [Kw]
34.677	130.487	0.0740
34.697	131.356	0.0745
34.587	126.479	0.0715
34.602	125.319	0.0709
34.482	124.182	0.0700
34.377	127.184	0.0715
34.272	127.441	0.0714
34.143	126.528	0.0706
34.033	119.070	0.0663
33.813	124.232	0.0687
33.803	126.914	0.0701
33.963	129.925	0.0721
33.833	122.828	0.0679
33.808	126.522	0.0699
33.818	123.723	0.0684
33.813	129.523	0.0716
33.818	124.039	0.0686
33.783	122.081	0.0674
33.838	121.663	0.0673
33.813	124.844	0.0690
33.803	127.931	0.0707
33.688	124.532	0.0686
33.693	131.559	0.0725
33.564	122.507	0.0672
33.599	129.606	0.0712
33.569	127.923	0.0702
33.813	131.506	0.0727
33.020	129.247	0.0698

32.685	130.198	0.0696
32.326	133.611	0.0706
31.907	135.810	0.0708
31.767	136.437	0.0709
31.422	132.511	0.0681
31.108	139.887	0.0711
30.918	140.391	0.0710
30.808	144.617	0.0728
30.694	133.722	0.0671
30.594	139.834	0.0699
30.604	136.389	0.0682
30.444	138.648	0.0690
30.574	137.859	0.0689
30.659	139.231	0.0698
30.684	141.717	0.0711
30.679	138.650	0.0695
30.923	136.066	0.0688
30.898	142.211	0.0718
30.918	136.248	0.0689
30.823	135.531	0.0683
30.808	137.294	0.0692
30.823	138.388	0.0697
31.023	143.267	0.0727
31.023	140.793	0.0714
30.923	143.792	0.0727
30.793	134.863	0.0679
30.679	135.460	0.0679
30.664	131.838	0.0661
30.279	143.035	0.0708
30.010	136.083	0.0668
30.015	141.749	0.0696
29.925	149.112	0.0730
30.000	139.127	0.0682
29.980	142.003	0.0696
29.890	144.156	0.0704
29.221	153.565	0.0734
28.877	148.023	0.0699
28.557	143.321	0.0669


28.562	145.528	0.0680
28.562	147.447	0.0689
28.467	148.192	0.0690
28.472	149.999	0.0698
28.472	153.877	0.0716
28.458	142.354	0.0662
28.572	150.383	0.0703
28.587	148.133	0.0692
28.572	151.575	0.0708
28.318	151.953	0.0704
27.684	148.735	0.0673
27.444	155.966	0.0700
26.783	167.753	0.0735
25.468	168.992	0.0704
24.794	166.482	0.0675
24.345	174.459	0.0694
24.245	173.295	0.0687
24.145	165.700	0.0654
24.103	167.774	0.0661
24.350	161.534	0.0643
24.459	168.611	0.0674
24.459	160.238	0.0641
24.369	160.556	0.0645
24.389	159.934	0.0643
24.449	160.110	0.0640
24.449	166.298	0.0665
24.379	167.421	0.0673
24.344	164.786	0.0661
24.340	173.497	0.0690
23.336	181.138	0.0691
22.568	179.772	0.0663
22.218	186.582	0.0678
22.099	177.716	0.0642
21.989	173.449	0.0624
21.974	172.378	0.0619
21.974	179.184	0.0644
21.425	178.230	0.0624
20.441	192.827	0.0644
19.877	191.614	0.0623
19.678	183.722	0.0591

19.568	190.215	0.0609
19.388	192.820	0.0611
18.759	193.516	0.0594
18.410	196.624	0.0592
18.340	193.370	0.0580
18.625	180.775	0.0550
18.879	174.385	0.0538
19.882	181.112	0.0589
20.217	177.148	0.0586
20.441	183.618	0.0614
20.546	187.244	0.0629
20.551	179.539	0.0603
20.676	178.685	0.0604
20.681	178.934	0.0605
20.661	183.790	0.0621
20.671	186.059	0.0629
20.676	180.037	0.0609
20.701	179.308	0.0607
20.701	181.354	0.0614
20.636	183.410	0.0619
20.671	181.402	0.0613
20.676	178.979	0.0605
20.686	177.564	0.0601
20.671	190.986	0.0645
20.686	177.728	0.0601
20.571	203.298	0.0684
19.004	205.498	0.0639
18.115	202.077	0.0599
17.571	196.276	0.0564
17.107	195.414	0.0547
17.012	194.297	0.0540
16.883	193.049	0.0533
16.878	201.203	0.0555
16.873	197.668	0.0545
16.878	199.487	0.0550
16.893	191.985	0.0530
16.868	191.443	0.0528
16.883	202.750	0.0560
16.758	199.213	0.0546
16.533	207.988	0.0562

16.299	202.211	0.0539
16.099	202.560	0.0533
15.999	197.192	0.0516
15.989	196.363	0.0513
15.984	202.566	0.0529
15.869	204.069	0.0529
15.745	201.895	0.0520
15.665	203.529	0.0521
15.540	206.169	0.0524
15.445	213.111	0.0538
15.240	206.847	0.0515
15.081	208.092	0.0513
14.996	203.060	0.0498
14.881	197.834	0.0481
14.891	205.498	0.0500
14.871	199.374	0.0485
14.871	209.428	0.0509
14.866	206.911	0.0503
14.906	205.433	0.0501
14.991	204.524	0.0501
14.212	229.832	0.0534
12.191	213.167	0.0425
11.317	231.337	0.0428
10.848	230.173	0.0408
10.658	229.752	0.0400
10.539	229.378	0.0395
10.429	222.320	0.0379
10.314	231.926	0.0391
10.324	214.662	0.0362
10.329	227.571	0.0384
10.339	224.879	0.0380
10.334	226.492	0.0383
10.294	234.731	0.0395
10.319	229.551	0.0387

10.289	234.383	0.0394
10.319	228.791	0.0386
10.279	228.746	0.0384
10.299	226.859	0.0382
10.299	232.802	0.0392
10.294	228.628	0.0385
10.304	225.492	0.0380
10.299	264.748	0.0446
4.973	255.438	0.0208
4.973	243.269	0.0198
4.948	256.812	0.0208
4.844	253.743	0.0201
4.834	259.888	0.0205
4.864	236.873	0.0188
4.869	253.680	0.0202
4.849	260.191	0.0206
4.829	257.631	0.0203
4.869	254.343	0.0202
4.849	249.823	0.0198
4.849	254.764	0.0202
4.859	247.910	0.0197
4.874	250.018	0.0199
4.864	259.537	0.0206
4.879	249.303	0.0199
0.496	291.443	0.0024
0.486	293.798	0.0023
0.506	298.748	0.0025
0.491	288.757	0.0023
0.486	291.791	0.0023
0.501	301.196	0.0025
0.486	293.586	0.0023
0.496	302.505	0.0025

Prueba Bomba 2 regulación con variador de velocidad.

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS		
		
Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos		
Fecha: 14 Julio de 2013		Bomba Activa: Bomba 2
Caudal [lpm]	Altura Bomba [Kpa]	Potencia Hidráulica [Kw]
38.715	125.811	0.0796
38.740	128.184	0.0812
38.849	128.030	0.0813
38.849	125.133	0.0795
38.859	128.499	0.0816
38.839	125.261	0.0795
38.819	124.947	0.0793
38.959	130.386	0.0831
38.924	124.991	0.0795
38.824	126.451	0.0803
38.810	126.313	0.0802
38.834	129.186	0.0820
38.790	128.437	0.0815
38.849	127.058	0.0807
38.824	125.781	0.0798
38.949	124.898	0.0795
38.934	124.112	0.0790
38.944	128.641	0.0819
38.819	124.967	0.0793
38.814	121.868	0.0773
38.844	125.515	0.0797
38.735	126.260	0.0800
38.720	127.615	0.0808
38.725	122.981	0.0779
38.615	124.744	0.0788
38.645	126.369	0.0798
38.635	129.429	0.0818
38.735	123.666	0.0783

38.730	123.935	0.0785
38.745	125.111	0.0793
38.710	122.704	0.0777
38.735	125.846	0.0797
38.755	120.218	0.0762
38.745	122.443	0.0776
38.715	126.028	0.0798
38.755	124.761	0.0791
38.730	126.435	0.0801
38.814	119.808	0.0760
38.859	120.024	0.0763
38.720	128.610	0.0814
38.735	128.554	0.0814
38.091	105.939	0.0660
36.773	100.835	0.0606
35.835	101.283	0.0593
35.540	101.881	0.0592
35.296	102.862	0.0594
35.241	99.620	0.0574
35.331	101.014	0.0584
35.241	102.555	0.0591
35.201	98.148	0.0565
35.196	101.969	0.0587
35.221	102.768	0.0592
35.226	98.820	0.0569
35.206	102.441	0.0590
35.211	104.143	0.0600
35.241	100.967	0.0582
35.231	97.567	0.0562
35.091	101.342	0.0581
35.216	101.625	0.0585
35.131	101.982	0.0586
35.236	103.417	0.0596
35.580	100.088	0.0582
35.535	96.952	0.0563
35.665	101.431	0.0591
35.665	102.772	0.0599
35.650	102.469	0.0597

35.660	101.583	0.0592
35.760	100.090	0.0585
35.790	103.433	0.0605
35.870	96.982	0.0569
35.775	105.029	0.0614
34.083	74.336	0.0414
32.630	75.820	0.0405
31.946	74.108	0.0387
31.597	73.376	0.0379
31.477	75.464	0.0388
31.392	74.863	0.0384
31.308	75.886	0.0388
31.153	76.028	0.0387
31.173	75.655	0.0386
31.068	76.099	0.0387
30.963	75.003	0.0380
30.973	77.555	0.0393
30.953	70.860	0.0359
30.873	75.509	0.0381
30.833	74.102	0.0374
30.843	77.666	0.0392
30.848	74.222	0.0374
30.858	73.925	0.0373
30.754	76.585	0.0385
30.843	75.961	0.0383
31.078	73.281	0.0372
31.083	73.977	0.0376
31.073	76.994	0.0391
31.178	72.549	0.0370
31.178	74.955	0.0382
31.068	77.850	0.0395
31.033	75.002	0.0381
31.058	77.807	0.0395
31.048	74.650	0.0379
30.953	52.498	0.0266
28.842	50.765	0.0239
27.604	50.728	0.0229
26.960	51.450	0.0227
26.731	52.400	0.0229
26.501	51.639	0.0224

26.396	52.024	0.0225
26.361	49.850	0.0215
26.386	52.542	0.0227
26.376	52.657	0.0227
26.386	52.186	0.0225
26.386	49.745	0.0215
26.441	50.737	0.0219
26.536	52.268	0.0227
26.376	53.084	0.0229
26.421	52.573	0.0227
26.421	53.398	0.0231
26.401	50.087	0.0216
26.466	52.999	0.0229
26.521	52.434	0.0227
26.521	51.093	0.0222
26.401	51.581	0.0223
26.406	52.511	0.0227
26.521	50.723	0.0220
26.496	51.940	0.0225
25.048	31.876	0.0131
23.601	31.511	0.0122
22.708	32.650	0.0121
22.258	31.431	0.0114
22.054	32.130	0.0116
21.834	30.548	0.0109
21.824	31.172	0.0111
21.774	32.473	0.0116
21.814	32.675	0.0117
21.684	32.915	0.0117
21.719	32.611	0.0116
21.689	32.151	0.0114
21.714	33.110	0.0118
21.719	31.380	0.0111
21.809	32.136	0.0115
21.844	31.859	0.0114
21.844	31.298	0.0112
21.814	31.807	0.0113
21.869	32.471	0.0116
21.879	30.147	0.0108
21.859	30.380	0.0109


21.854	30.991	0.0111
21.829	32.159	0.0115
21.809	34.061	0.0122
21.809	32.061	0.0114
21.829	20.537	0.0073
19.478	15.544	0.0050
18.290	14.906	0.0045
17.497	15.860	0.0045
17.167	15.831	0.0044
16.938	16.326	0.0045
16.833	15.585	0.0043
16.768	15.626	0.0043
16.843	16.049	0.0044
16.723	15.826	0.0043
16.728	15.819	0.0043
16.688	15.882	0.0043
16.718	16.563	0.0045
16.843	14.252	0.0039
16.823	15.900	0.0044
16.818	16.284	0.0045
16.813	16.017	0.0044
16.823	16.658	0.0046
16.828	15.099	0.0042
16.818	15.932	0.0044
16.828	14.807	0.0041
16.943	15.586	0.0043
16.933	16.226	0.0045
16.933	16.065	0.0044
16.823	15.231	0.0042
16.843	16.221	0.0045
16.958	15.685	0.0043
16.938	16.735	0.0046
16.838	16.335	0.0045
16.833	15.348	0.0042
16.828	16.541	0.0046
15.844	2.787	0.0007
13.608	2.839	0.0006
12.361	3.901	0.0008
11.816	3.087	0.0006
11.462	3.685	0.0007

11.362	2.866	0.0005
11.237	2.929	0.0005
11.252	2.530	0.0005
11.158	2.855	0.0005
11.138	2.970	0.0005
11.257	3.502	0.0006
11.103	3.292	0.0006
11.158	2.971	0.0005
11.247	3.722	0.0007
11.267	2.953	0.0005
11.232	3.230	0.0006
11.163	3.943	0.0007
11.267	2.892	0.0005
11.277	3.296	0.0006
11.267	2.911	0.0005
11.138	2.483	0.0005
11.143	3.168	0.0006
11.178	3.538	0.0006
11.163	3.091	0.0006
11.138	2.763	0.0005
11.113	0	0
4.729	0	0
4.479	0	0
4.389	0	0
4.379	0	0
4.310	0	0
4.399	0	0
4.409	0	0
4.409	0	0
4.329	0	0
4.384	0	0
4.384	0	0
4.414	0	0
4.494	0	0
4.514	0	0
4.479	0	0
4.404	0	0
4.374	0	0
4.499	0	0
4.494	0	0

4.484	0	0
4.489	0	0
4.504	0	0
4.494	0	0
4.399	0	0
4.509	0	0
4.394	0	0
0.481	0	0
0.506	0	0
0.506	0	0
0.496	0	0
0.506	0	0
0.511	0	0
0.506	0	0
0.521	0	0
0.491	0	0
0.506	0	0
0.506	0	0
0.506	0	0
0.526	0	0
0.521	0	0
0.486	0	0
0.526	0	0
0.461	0	0
0.491	0	0
0.506	0	0
0.501	0	0
0.501	0	0
0.501	0	0
0.491	0	0
0.511	0	0
0.491	0	0
0.481	0	0
0.486	0	0
0.541	0	0
0.516	0	0
0.516	0	0
0.496	0	0

0.486	0	0
0.501	0	0
0.491	0	0
0.481	0	0
0.501	0	0
0.491	0	0
0.491	0	0
0.501	0	0
0.486	0	0
0.486	0	0
0.476	0	0
0.496	0	0
0.501	0	0
0.491	0	0
0.501	0	0
0.501	0	0
0.501	0	0
0.491	0	0
0.501	0	0
0.516	0	0
0.501	0	0
0.501	0	0
0.521	0	0
0.501	0	0
0.521	0	0
0.501	0	0
0.521	0	0
0.491	0	0
0.486	0	0
0.536	0	0
0.496	0	0
0.516	0	0
0.521	0	0
0.486	0	0
0.506	0	0
0.516	0	0
0.501	0	0
0.511	0	0

Prueba Bombas 1 y 2 acopladas en serie regulación con válvula en la descarga.

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS		
	Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos	
Fecha: 14 Julio de 2013	Bomba Activa: Bomba 1y2	
Caudal [lpm]	Altura Bomba [Kpa]	Potencia Hidráulica [Kw]
50.2995	284.4817	0.2340
50.2895	298.5437	0.2455
50.2995	283.2038	0.2329
50.3944	285.4762	0.2352
50.3993	266.4325	0.2195
50.2746	282.3851	0.2321
50.4043	282.7495	0.2330
50.4493	286.6109	0.2364
50.3095	284.2699	0.2338
50.1398	286.4166	0.2348
50.1598	290.8264	0.2385
50.7338	295.0749	0.2448
50.9734	279.6976	0.2331
51.0882	283.9132	0.2372
50.9484	304.4616	0.2536
49.6407	335.5990	0.2724
48.7422	341.9057	0.2725
47.2648	377.8299	0.2920
45.5528	366.0267	0.2726
44.4896	374.4613	0.2724
43.7260	365.1178	0.2610
43.3865	370.0360	0.2625
43.3167	373.5692	0.2646
43.4914	373.1584	0.2653
43.4864	379.2163	0.2696
43.5013	360.2909	0.2563
43.6062	346.1783	0.2468
43.3965	361.7811	0.2567

43.7359	363.5519	0.2600
43.7160	372.5656	0.2663
43.8457	369.7527	0.2651
43.7260	355.7146	0.2543
43.5413	360.5245	0.2567
43.5912	366.9356	0.2615
43.1719	379.4188	0.2678
42.7327	360.0569	0.2516
42.3933	375.4166	0.2602
42.3184	377.9997	0.2615
42.3034	386.7457	0.2675
42.4082	387.7805	0.2689
43.5063	377.3445	0.2684
44.0704	385.2230	0.2776
44.6543	388.1111	0.2834
44.8490	394.8702	0.2896
44.7292	366.7471	0.2682
44.8540	370.3396	0.2716
44.8290	377.6231	0.2768
44.5944	386.1818	0.2816
44.3998	383.7215	0.2786
44.3898	392.1089	0.2846
44.3049	402.5803	0.2916
44.2750	383.7702	0.2778
44.1802	395.4552	0.2857
44.1951	383.4691	0.2771
44.1552	379.6971	0.2741
43.9506	404.8731	0.2909
43.4115	376.3277	0.2671
43.2069	391.9894	0.2769
43.0671	377.9270	0.2661
40.9807	439.3418	0.2944
38.7147	457.4888	0.2896
37.4020	452.8390	0.2769
36.0892	460.6988	0.2718
35.2707	465.7312	0.2686
34.7166	456.3662	0.2590
34.3872	472.1252	0.2654

34.2524	485.2075	0.2717
34.2774	453.9811	0.2544
34.2574	465.9497	0.2610
34.2624	465.0582	0.2605
34.1626	486.5736	0.2718
34.1576	449.8071	0.2512
34.0378	487.2726	0.2712
34.0528	461.4735	0.2569
33.9330	479.1364	0.2658
33.9080	483.1794	0.2679
33.9430	462.6432	0.2568
33.9130	472.5074	0.2620
33.9230	464.6276	0.2577
33.8282	491.9768	0.2721
33.5786	470.9982	0.2586
33.4788	471.1546	0.2579
32.1511	498.2396	0.2619
31.4523	496.3641	0.2553
29.8651	507.5803	0.2478
28.9067	501.6326	0.2371
28.8868	500.3969	0.2363
28.9267	478.0297	0.2261
28.8169	491.7013	0.2317
28.6771	472.4819	0.2215
28.5723	489.2013	0.2285
28.4675	477.3845	0.2222
28.4675	480.3100	0.2236
28.4675	496.8237	0.2312
30.0398	498.7012	0.2449
30.7036	497.9687	0.2500
31.1628	483.2645	0.2462
31.3425	508.4061	0.2605
30.4690	545.2115	0.2716
29.6754	528.5572	0.2565
28.7570	537.3101	0.2526
28.2379	527.9056	0.2437
27.8935	537.8192	0.2453
27.6938	539.8735	0.2445
27.5890	526.3108	0.2374
27.5790	517.8594	0.2335

27.5790	535.0870	0.2413
27.5840	539.1519	0.2432
27.5740	530.2431	0.2391
27.4543	541.9529	0.2433
27.5641	491.5287	0.2215
27.3494	575.1947	0.2572
25.6923	575.4891	0.2417
24.4744	562.9490	0.2253
24.0152	567.5369	0.2228
23.8905	564.1578	0.2204
23.8056	569.8131	0.2218
23.7906	565.4662	0.2200
23.6808	560.8360	0.2171
23.6758	560.4080	0.2169
23.6858	564.4246	0.2186
23.7757	561.8216	0.2184
23.6658	580.5715	0.2246
23.6708	553.6977	0.2143
22.2383	641.7654	0.2333
19.4582	663.4682	0.2111
17.6413	647.2762	0.1867
16.8627	644.5339	0.1777
16.5782	626.5585	0.1698
16.2288	613.8298	0.1629
15.9792	647.7689	0.1692
15.8744	655.6872	0.1702
15.6348	651.6290	0.1666
15.5549	665.0636	0.1691
15.5699	629.3757	0.1602
15.5649	647.8360	0.1649
15.6747	659.2107	0.1689
15.6747	643.4343	0.1649
15.6598	631.9693	0.1618
15.5250	642.2785	0.1630
15.5450	648.6303	0.1649
15.5450	648.3181	0.1648
15.2006	650.5899	0.1617
15.0957	633.3888	0.1563
14.9859	663.7620	0.1626
14.9859	663.9983	0.1627


14.8811	657.2047	0.1599
14.7464	666.6012	0.1612
14.6415	709.4890	0.1698
15.0408	646.4661	0.1590
16.2637	691.0493	0.1838
15.3253	654.1699	0.1639
14.4618	695.9304	0.1646
13.7431	647.8118	0.1456
13.5085	694.2719	0.1533
13.2939	729.7869	0.1586

13.0543	650.7063	0.1389
13.8779	666.1749	0.1512
14.3271	685.1440	0.1605
14.2872	660.9078	0.1544
14.4119	667.3837	0.1573
14.4119	674.9667	0.1590
14.2921	686.9344	0.1605
14.1973	664.6569	0.1543
14.2073	658.2374	0.1529


Prueba Bomba 1 regulación con válvula en la descarga

<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b> <b>LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS</b>							
		Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos					
Fecha: 14 Julio 2013		Motor Monofásico	Motor Trifásico				Eficiencia %
Caudal [lpm]	Potencia Hidráulica [Kw]	Potencia Eléctrica [Kw]	Frecuencia [Hz]	Potencia Línea 1 [Kw]	Potencia Línea 2 [Kw]	Potencia Línea 3 [Kw]	
0	0.0045	1.1	-	-	-	-	0.412
5	0.0469	1.11	-	-	-	-	4.221
10	0.0990	1.11	-	-	-	-	8.922
15	0.1064	1.12	-	-	-	-	9.496
20	0.1246	1.13	-	-	-	-	11.023
25	0.1315	1.13	-	-	-	-	11.634
30	0.1585	1.15	-	-	-	-	13.785
35	0.1578	1.16	-	-	-	-	13.605
40	0.1486	1.17	-	-	-	-	12.699
43.726	0.1662	1.17	-	-	-	-	14.203


Prueba Bomba 2 regulación con válvula en la descarga

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS							
		Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos					
Fecha: 14 Julio 2013		Motor Monofásico	Motor Trifásico				Eficiencia %
Caudal [lpm]	Potencia Hidráulica [Kw]	Potencia Eléctrica [Kw]	Frecuencia [Hz]	Potencia Línea 1 [Kw]	Potencia Línea 2 [Kw]	Potencia Línea 3 [Kw]	
35	0.0715	-	45	0.03	0.09	0.1	32.511
30	0.0696	-	45	0.07	0.11	0.1	24.844
25	0.0675	-	45	0.05	0.08	0.1	29.343
20	0.0586	-	45	0.08	0.08	0.09	23.422
15	0.0513	-	45	0.05	0.09	0.1	21.379
10	0.0446	-	45	0.05	0.05	0.09	23.464
5	0.0208	-	45	0.08	0.08	0.1	7.989
0	0.0023	-	45	0.06	0.08	0.1	0.972

Prueba Bomba 2 regulación con variador de velocidad

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS							
		Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos					
Fecha: 14 Julio 2013		Motor Monofásico	Motor Trifásico				Eficiencia %
Caudal [lpm]	Potencia Hidráulica [Kw]	Potencia Eléctrica [Kw]	Frecuencia [Hz]	Potencia Línea 1 [Kw]	Potencia Línea 2 [Kw]	Potencia Línea 3 [Kw]	
39	0.0831	-	45	0.06	0.09	0.1	1.111
35	0.0587	-	40.9	0.06	0.1	0.07	0.700
30	0.0385	-	35.8	0.06	0.09	0.05	0.556
25	0.0131	-	30.6	0.03	0.05	0.04	0.800
20	0.0050	-	25.5	0.04	0.03	0.04	1.333
15	0.0007	-	20.4	0.02	0.03	0.02	0.667
10	0.0005	-	15.3	0.02	0.03	0.02	0.667
5	0.0000	-	10.1	0.03	0.02	0.02	1.000

Prueba Bombas 1 y 2 regulación con válvula en la descarga

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA LABORATORIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE Y APROVECHAMIENTO DE FLUIDOS							
		Caracterización de Sistemas de transporte de líquidos					
Fecha: 14 Julio 2013		Motor Monofásico		Motor Trifásico			Eficiencia %
Caudal [lpm]	Potencia Hidráulica [Kw]	Potencia Eléctrica [Kw]	Frecuencia [Hz]	Potencia Línea 1 [Kw]	Potencia Línea 2 [Kw]	Potencia Línea 3 [Kw]	
10	0.157259	1.13	45	0.08	0.09	0.1	11.233
15	0.168944	1.14	45	0.07	0.09	0.1	12.067
20	0.2024	1.15	45	0.07	0.08	0.1	14.455
25	0.2253	1.14	45	0.07	0.09	0.1	16.091
30	0.2222	1.15	45	0.07	0.09	0.1	15.759
35	0.2605	1.15	45	0.08	0.1	0.11	18.092
40	0.2896	1.15	45	0.06	0.06	0.08	20.110
45	0.2625	1.17	45	0.08	0.1	0.11	17.979
50	0.2406	1.16	45	0.06	0.08	0.08	17.435