



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS, UTILIZANDO PLC-VARIADOR-BOMBA, PARA LA OBTENCIÓN DEL PUNTO DE OPERACIÓN DE LA INTERACCIÓN BOMBA-SISTEMA, EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”

ANDRÉS RODRIGO GUANO BERMEO  
FRANCISCO JAVIER JIJÓN VACA



**TODO  
ES POSIBLE  
EN LA MEDIDA QUE  
TÚ CREAS  
QUE ES POSIBLE**

*Arturo Orantes*



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## Objetivo General:

Diseñar y construir un banco de pruebas para bombas centrífugas, utilizando PLC-Variador-Bomba, para la obtención del punto de operación de la interacción bomba-sistema, en el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerza Armadas-ESPE

# Objetivos Específicos:

- Seleccionar los diferentes dispositivos para el banco de pruebas.
- Conocer el funcionamiento de cada elemento que intervienen en el banco de pruebas.
- Construir la estructura del Banco de Pruebas.
- Ensamblar todos los elementos en el Banco de Pruebas con las conexiones necesarias.
- Realizar la programación para obtener el punto óptimo de operación en la bomba centrífuga.
- Realizar pruebas a diferentes velocidades y observar el comportamiento de la bomba.

# Descripción del proyecto

Está diseñado para el análisis de la curva característica de la bomba y de la curva que tiene el sistema, con las mismas que se obtendrá el punto de operación de la interacción bomba-sistema, para ello el PLC se encarga de tomar datos de las variables de Presión y Caudal que son enviadas como señal estándar de 4 a 20 mA con la ayuda de los transmisores industriales, el PLC una vez procesada la información envía todos estos datos a través de una red Ethernet a un OPC para poder enlazar el PLC con la computadora en donde se generan las curvas deseadas.

# Descripción del proyecto

Un extra que tiene el banco de pruebas es que el PLC recibirá una señal estándar de 4 a 20 mA de la variable del proceso de caudal, tiene la capacidad de controlar el caudal de agua en base a un lazo de control, el PLC envía la señal de control al variador de frecuencia para regular la velocidad de una bomba centrífuga trifásica y de este modo mantener un caudal constante de acuerdo al valor que se desee. Será posible visualizar las variables del proceso en una TOUCH SCREEN que tiene un HMI en el cual se puede sintonizar y monitorear la variable, y desde el computador.

# Banco de Pruebas de bombas centrífugas



# COMPONENTES UTILIZADOS:

**PLC S7-1200 CPU-1214C AC/DC/RLY:** elemento primordial del sistema encargado de realizar las funciones de control, adquisición de datos, gestionar las comunicaciones con el HMI y la PC. En lazo abierto realiza adquisición de datos y en lazo cerrado realiza un control.



**Módulo SM1234:** dispositivo de entradas y salidas analógicas, que permite interactuar al autómeta con los instrumentos de campo, integrado de dos salidas analógicas de voltaje o corriente y cuatro entradas de voltaje o corriente.



**Touch Panel KTP600 Basic Color PN:** instrumento que permite realizar una interfaz humano máquina a través del cual el usuario podrá visualizar y configurar el funcionamiento del caudal entregando al operador valores de set point, parámetros de sintonización, curvas de proceso.



**Fuente LOGO Power de 24 Vdc:** fuente de alimentación de corriente continua de 24 voltios, como la mayoría de los equipos e instrumentos están diseñados para funcionar con una tensión de 24 Vdc, se la utiliza para alimentar la TOUCH PANEL, los transmisores y relé.



**Tanque de 60 litros:** recipiente en el cual se almacena el agua, representa el punto de partida y de llegada del sistema.



**Tubo de  $\frac{3}{4}$  de pulgada PVC:** canal o conducto por donde circula el agua del proceso.



**Variador de frecuencia Sinamics G110:** dispositivo encargado de variar la velocidad del motor trifásico de la bomba centrífuga, mediante la variación de frecuencia suministrada al motor variando así el flujo de agua que circula por la tubería del proceso.



**Panel básico de operador BOP:** permite modificar el valor de los parámetros de la bomba a controlar, con el fin de que el variador de frecuencia funcione correctamente.



**Bomba trifásica de 1HP:** bomba centrífuga que funciona mediante un motor trifásico que permite succionar e impulsar el agua, para que circule por la tubería del sistema.



**Válvulas de tipo bola V2-1 y V2-2:** mecanismo con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación de líquidos mediante una pieza móvil que en su interior tiene forma de esfera perforada la cual abre, cierra u obstruye en forma parcial o total orificios o conductos.

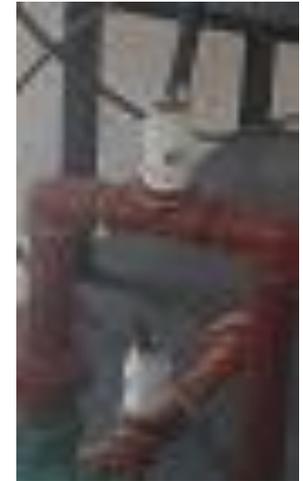


**Válvula de compuerta V1:** es una válvula que abre mediante el levantamiento de una compuerta o cuchilla (la cuál puede ser redonda o rectangular) permitiendo así el paso del fluido.





**Sensor de presión manométrica:** ubicado en contacto con la tubería y conectado de forma compacta al transmisor de presión. Mide la diferencia entre la presión absoluta o real y la presión atmosférica



**Transmisores de presión:** instrumentos que convierten la señal de frecuencia dada por el sensor de flujo en una señal estándar de 4 a 20 mA para una transmisión a larga distancia.



**Switch:** Un conmutador o switch es un dispositivo digital lógico de interconexión de equipos.

Su función es interconectar dos o más segmentos de red, de manera similar a los puentes de red,



# DISPOSITIVOS PARA OBTENCIÓN DE DATOS:

Los sensores utilizados en la obtención de los datos para el banco de pruebas de bombas centrífugas son: el sensor de flujo de paletas y los sensores de presión manométrica.

Los sensores están acoplados a los transmisores industriales para obtener señales estándar de corriente, las cuales son muy importantes para el banco de pruebas de bombas centrífugas ya que a partir de ellas se obtienen las curvas de la bomba y el sistema.

# SENSOR DE FLUJO:

El sensor de flujo de paletas se requiere para medir la variable caudal que circula a través de la tubería, ya que al poner en funcionamiento la bomba centrífuga a diferentes frecuencias o al cierre de las válvulas en la tubería, el caudal circulante va variando y gracias a la ayuda del transmisor de flujo se puede observar los cambios del caudal.

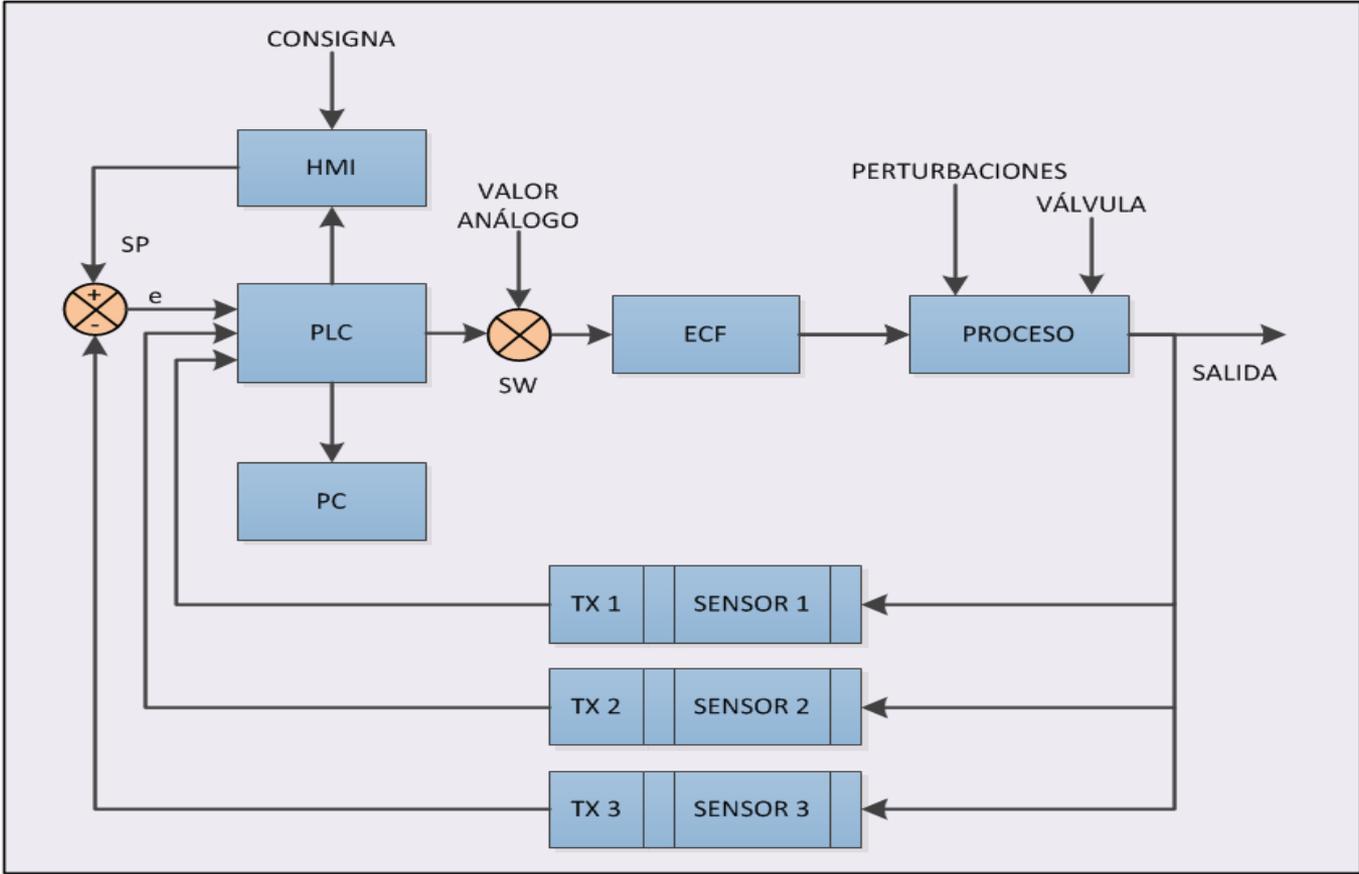
Los datos obtenidos por el sensor de flujo también son empleados en la construcción de la curva de la bomba, curva del sistema, el control y monitoreo de la variable caudal.

# SENSOR DE PRESIÓN:

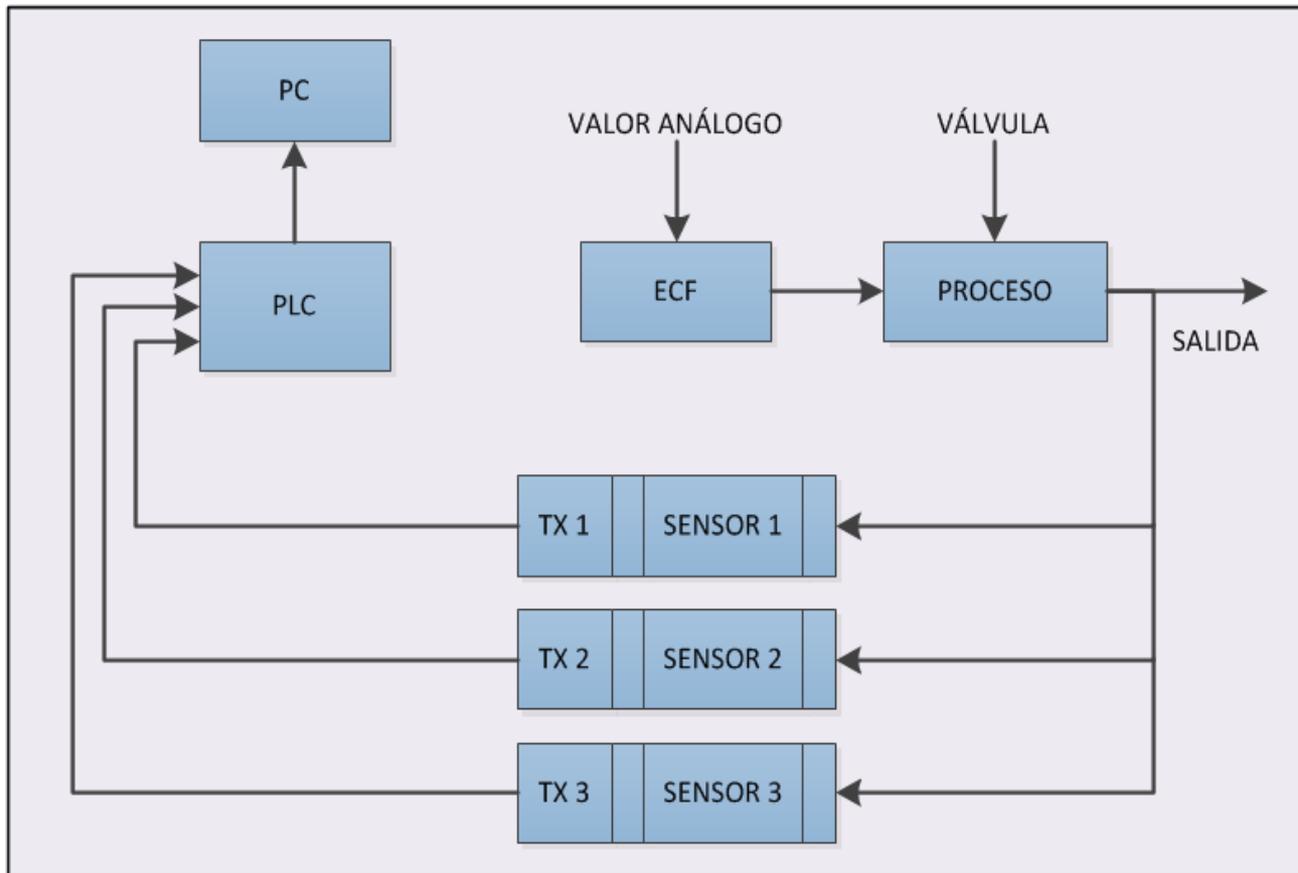
Los sensores de presión se los requiere para medir la presión que existe a la succión y a la impulsión del caudal en la bomba centrífuga, ya que al poner en funcionamiento la bomba a diferentes frecuencias o al cierre de las válvulas en la tubería, la presión tanto en la succión y la impulsión van variando.

Los sensores de presión se los utiliza para la construcción de la curva de la bomba ya que la altura total se tiene en función de la diferencia de presiones de la impulsión y la succión.

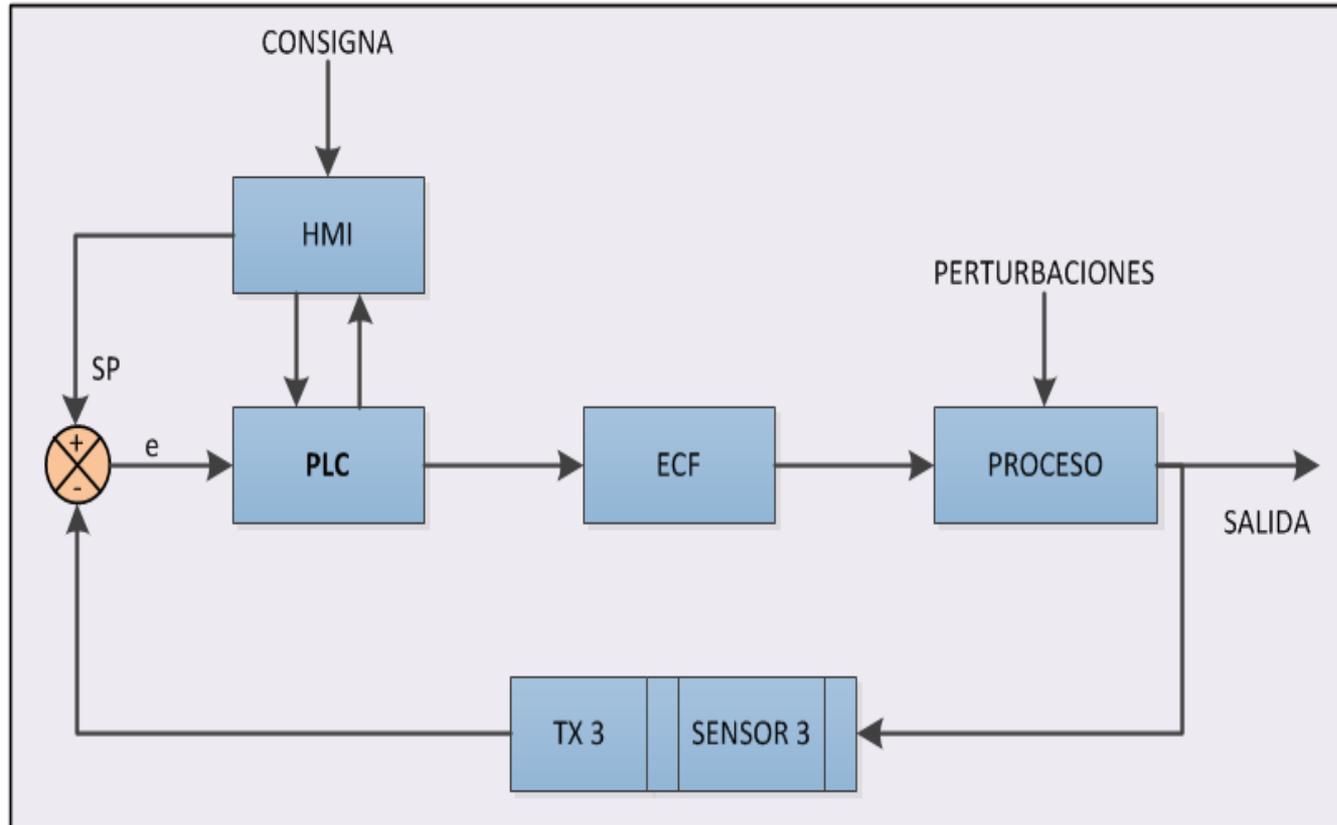
# DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA



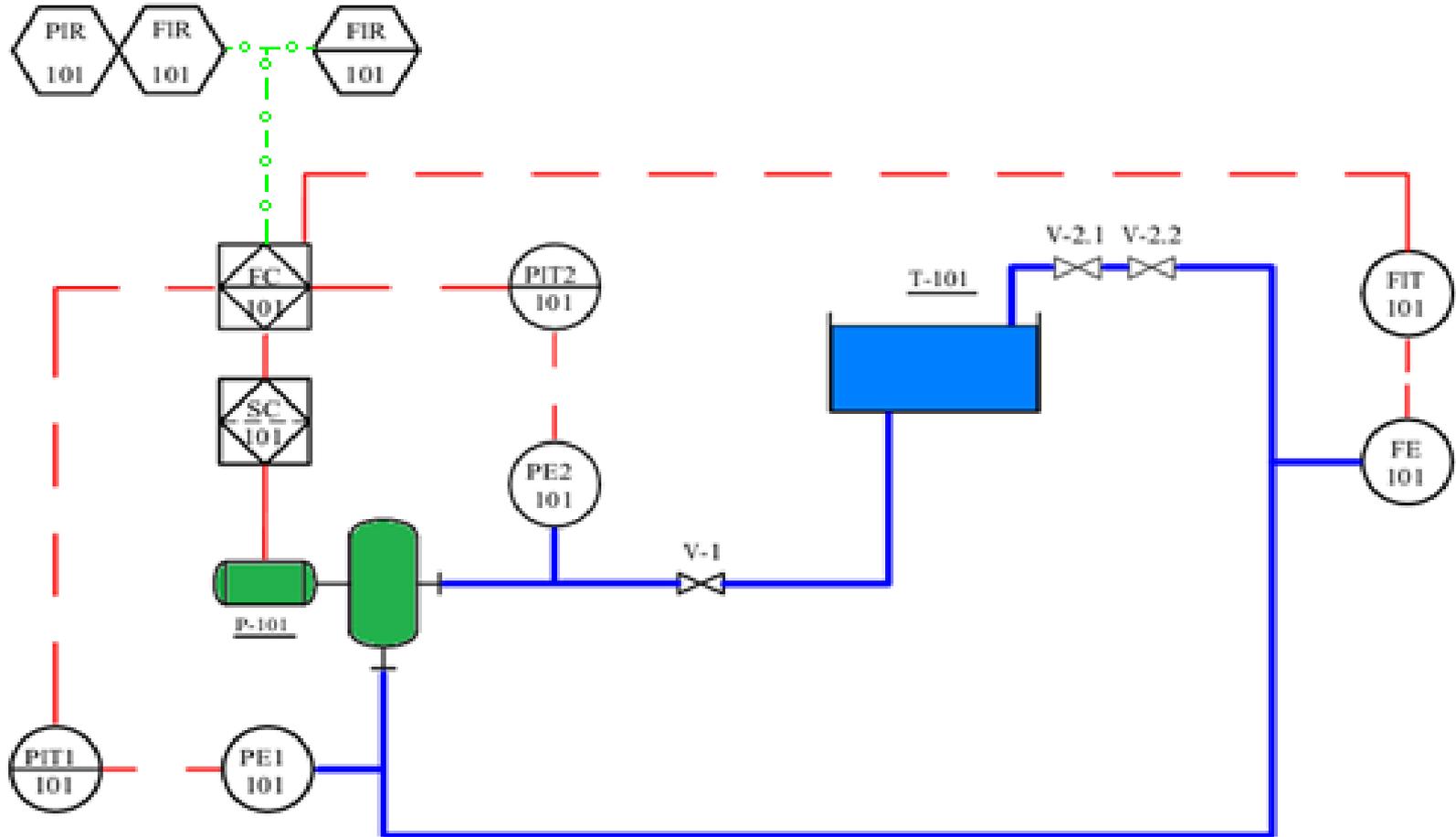
# DIGRAMA DE BLOQUES LAZO ABIERTO



# DIGRAMA DE BLOQUES LAZO CERRADO



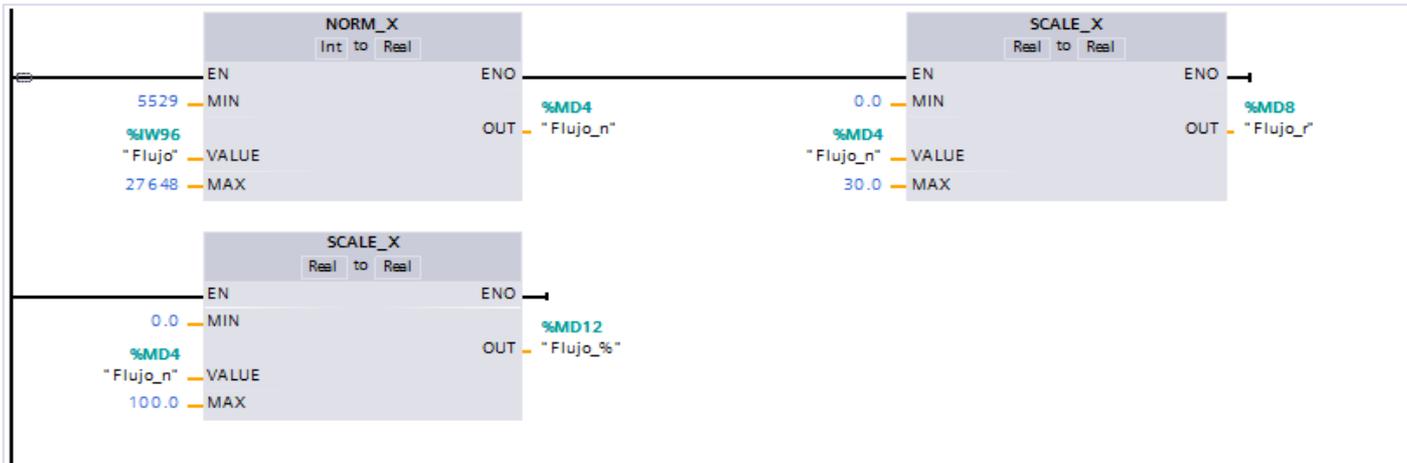
# Diagrama P&ID



# Programación del PLC

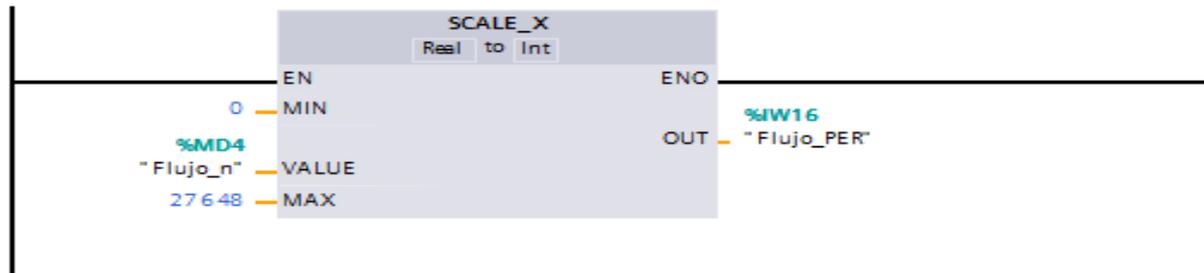
## Segmento 1: Acondicionamiento de Flujo

Comentario



## Segmento 2: .....

Comentario



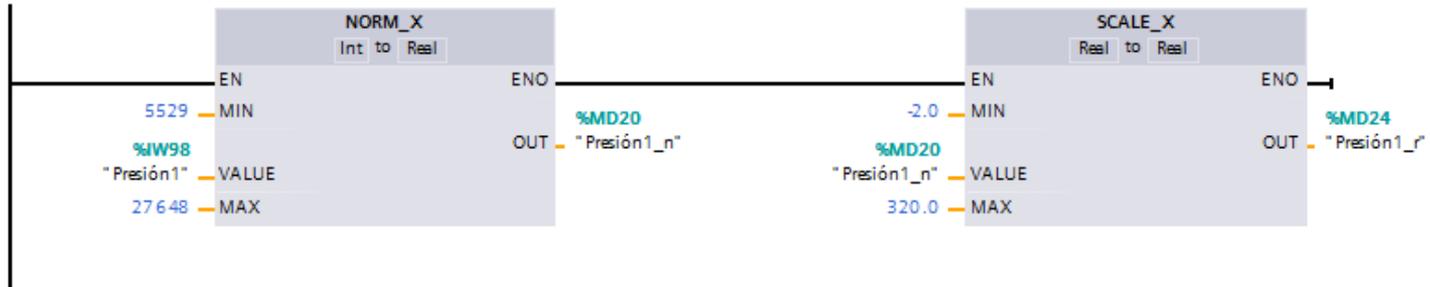
"Flujo_n"	%MD4	
"Flujo_PER"	%W16	



# Programación del PLC

## ▼ Segmento 3: Acondicionamiento de Presión1

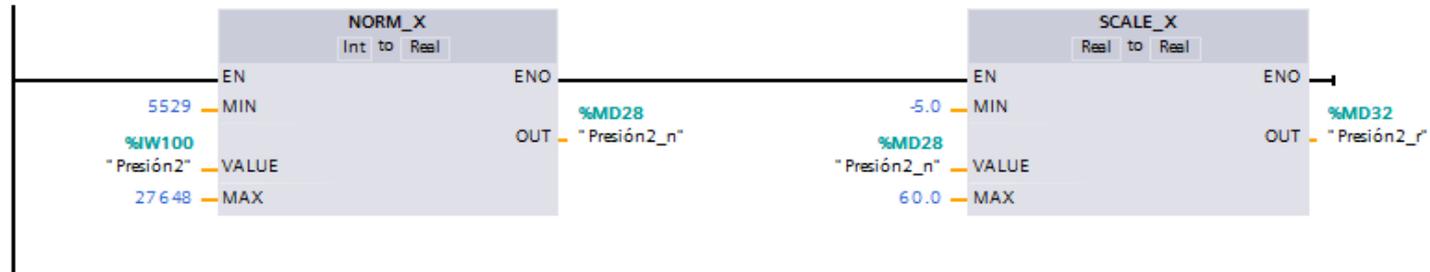
Comentario



▼ "Presión1"	%IW98	
"Presión1_n"	%MD20	
"Presión1_r"	%MD24	

## ▼ Segmento 4: Acondicionamiento de Presión2

Comentario

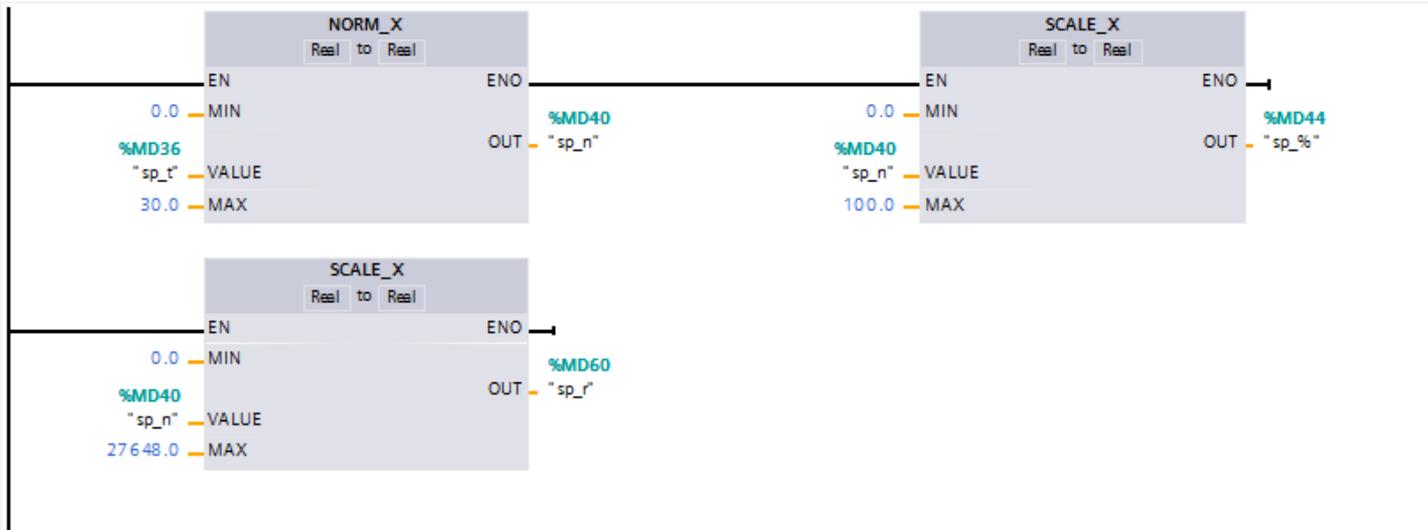


▼ "Presión2"	%IW100	
"Presión2_n"	%MD28	
"Presión2_r"	%MD32	

# Programación del PLC

## Segmento 6: Acondicionamiento de SETPOINT

Comentario



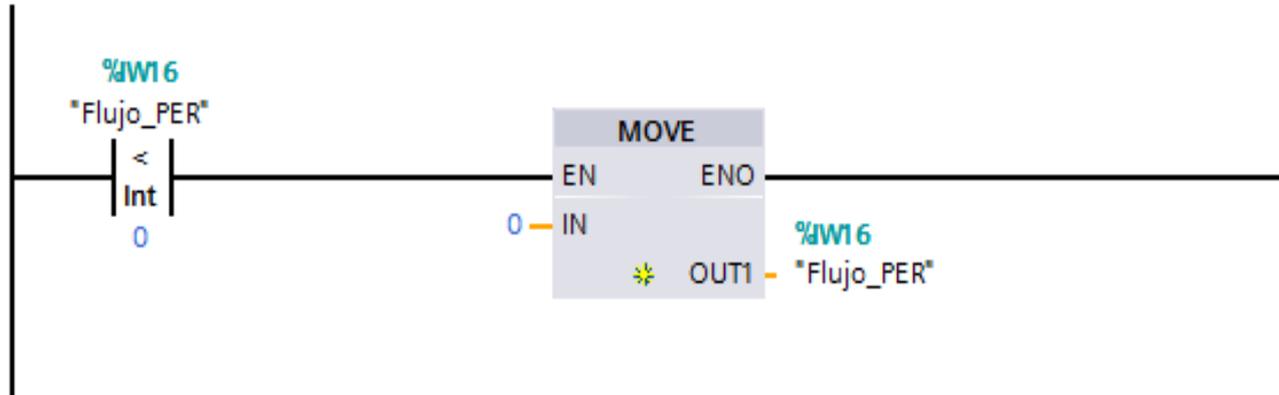
"sp_t"	%MD36	
"sp_n"	%MD40	
"sp_%"	%MD44	
"sp_r"	%MD60	

# Programación del PLC

## BLOQUE DE PROGRAMA CYCLIC INTERRUPT

▼ Segmento 1: Pone en cero al flujo

Comentario



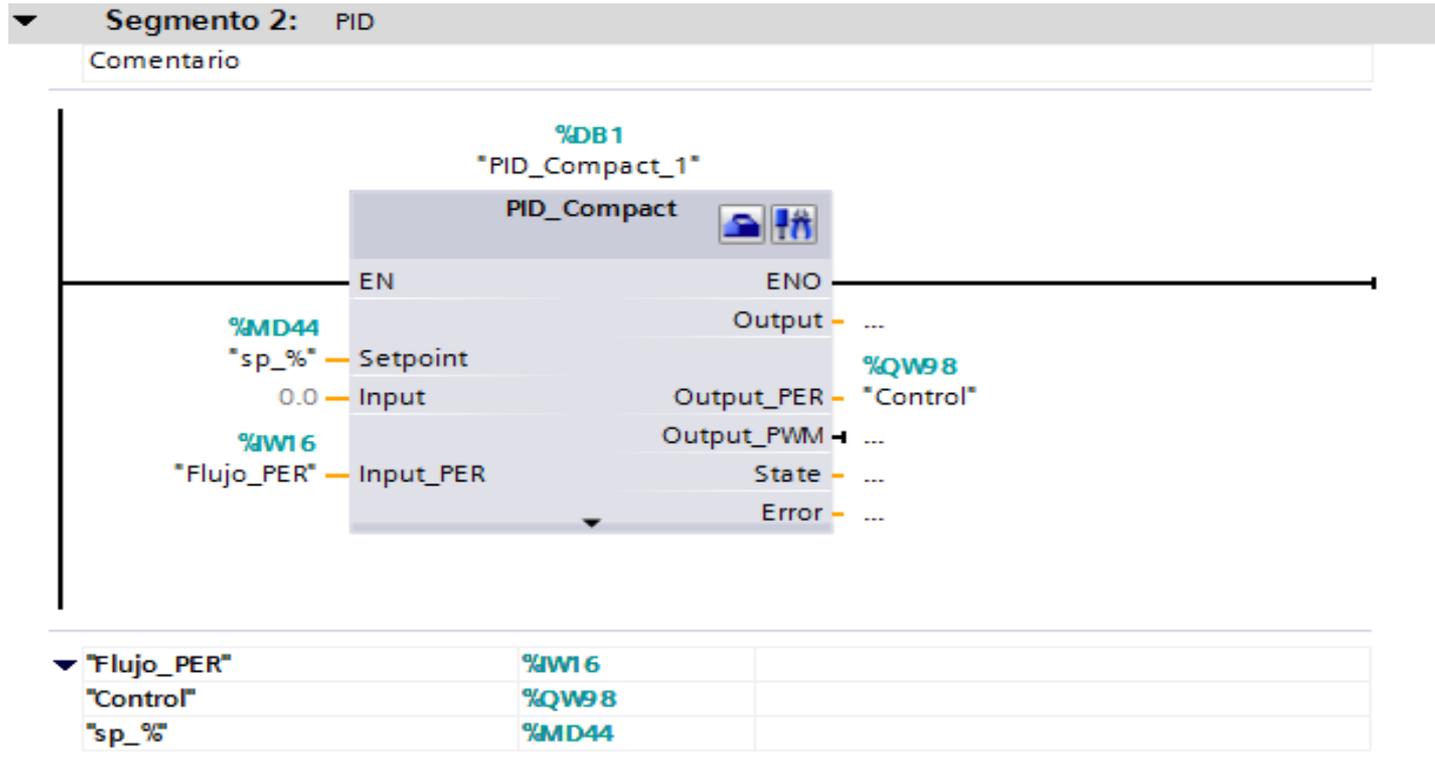
"Flujo\_PER"

%IW16



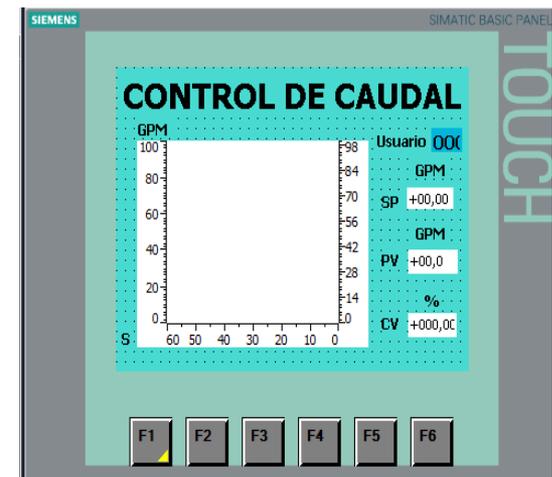
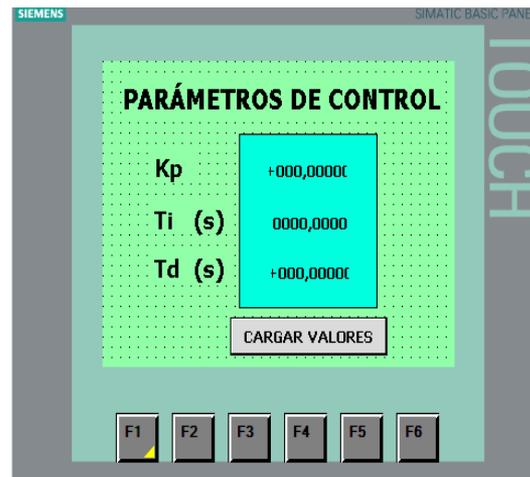
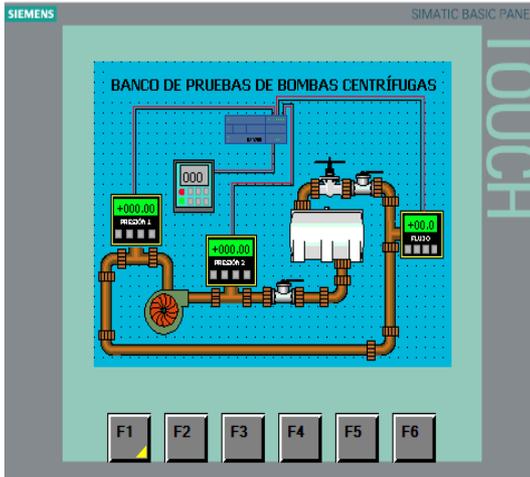
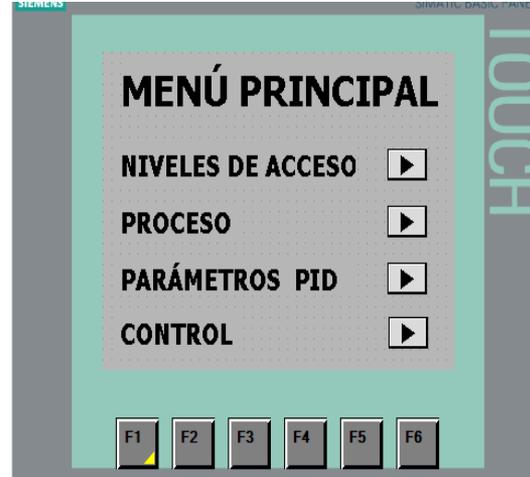
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Programación del PLC



# Programación del PLC

## TOUCH PANEL



# Programación de LabVIEW

PRESENTACIÓN | DIAGRAMAS P&ID / BLOQUE | DATOS / CURVAS BOMBA | CURVA SISTEMA/ ANÁLISIS DE CURVAS | CONTROL

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
ESPE-EXTENSIÓN LATACUNGA  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
E INSTRUMENTACIÓN

BANCO DE PRUEBAS DE BOMBAS  
CENTRÍFUGAS UTILIZANDO  
PLC-VARIADOR-BOMBA, PARA LA  
OBTENCIÓN DEL PUNTO DE OPERACIÓN  
DE LA INTERACCIÓN BOMBA-SISTEMA



INTEGRANTES:  
\* ANDRÉS GUANO  
\* FRANCISCO JIJON



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# CURVA DE LA BOMBA

La curva de la bomba describe el funcionamiento de la bomba centrífuga durante su operación.

La altura total entregada por la bomba disminuye a medida que el caudal aumenta.

Para cada valor de frecuencia se genera una curva diferente de la bomba centrífuga, ya que se analiza el cambio de caudal y altura, a una velocidad de giro constante (frecuencia constante).

# CURVA DE LA BOMBA

Para obtener la altura (cabeza total) se requiere realizar una diferencia de presiones entre la impulsión y la succión como se indica en la fórmula.

$$H_m = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$$

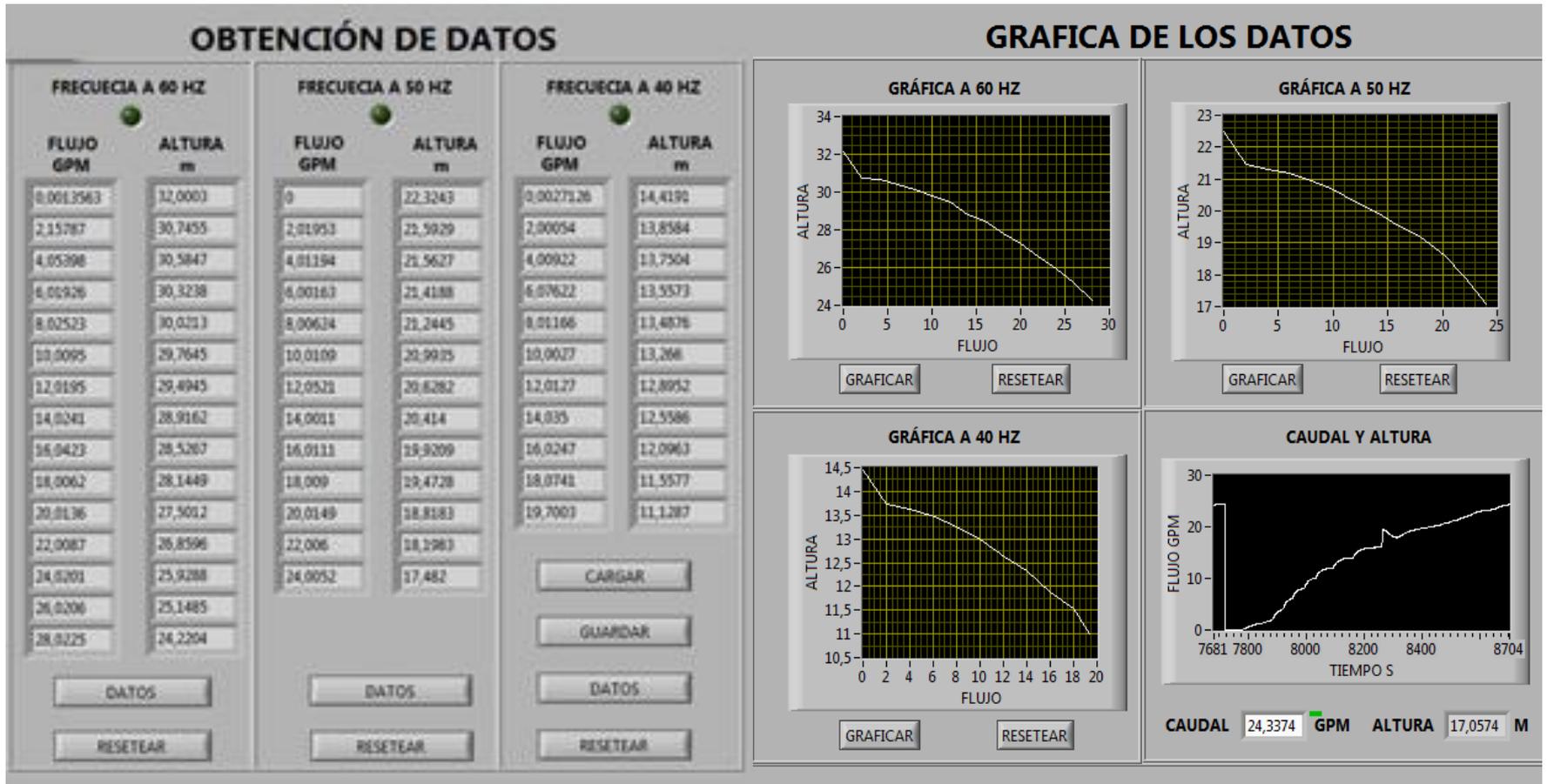
Donde:

P1= Presión a la impulsión

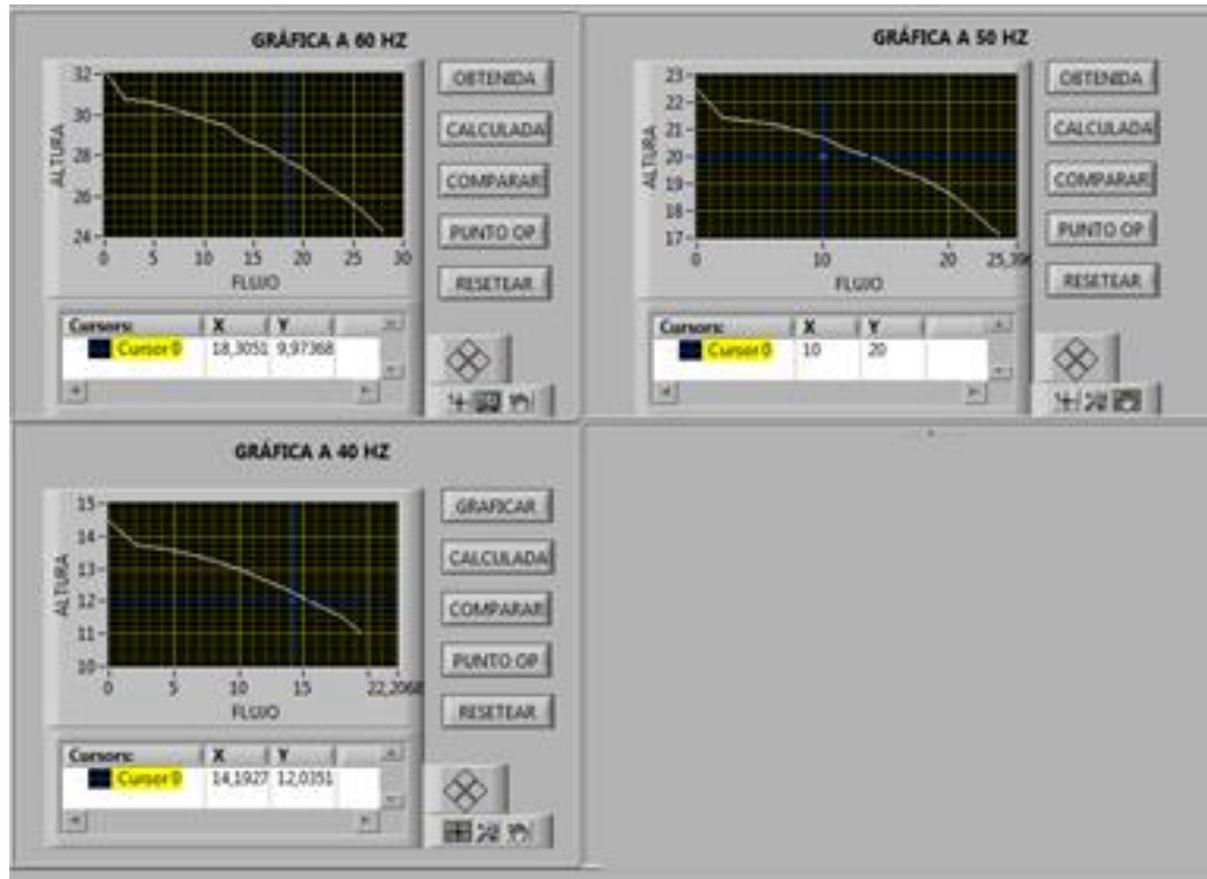
P2= Presión a la succión

$\gamma$ = Peso específico del agua 9800 N/m<sup>3</sup>

# CURVA DE LA BOMBA



# Programación de LabVIEW



# CURVA DE LA BOMBA RECONSTRUIDA

Las curvas de caudal contra altura se conoce como la curva de la bomba.

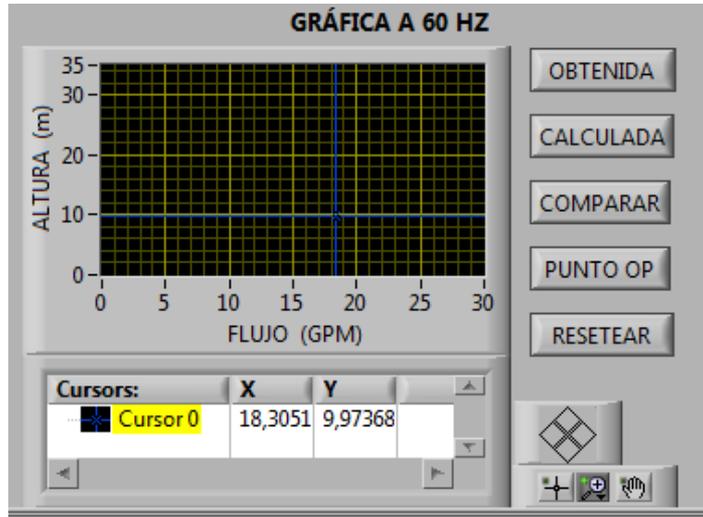
Por lo general, la curva de caudal contra altura ( $H_m$ ) (curva de la bomba) para una bomba centrifuga se puede expresar en la siguiente forma funcional:

$$H_m = AQ^2 + BQ + C$$

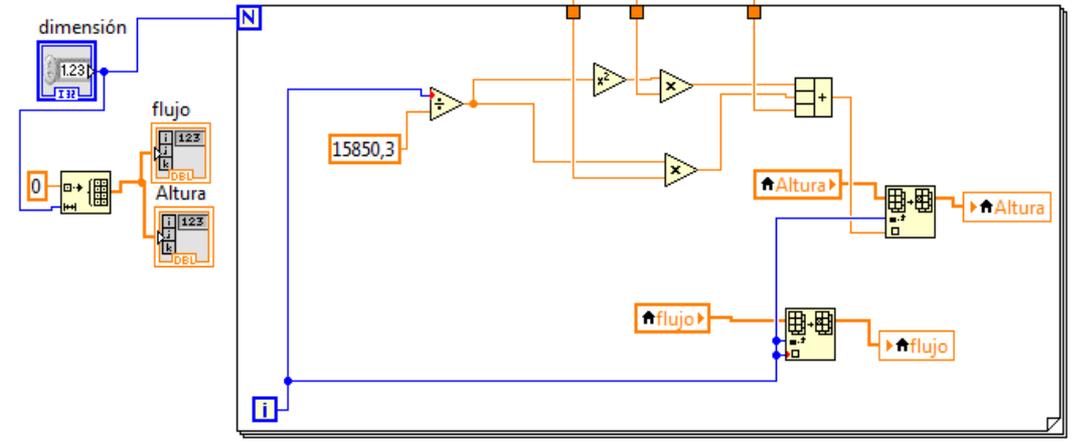
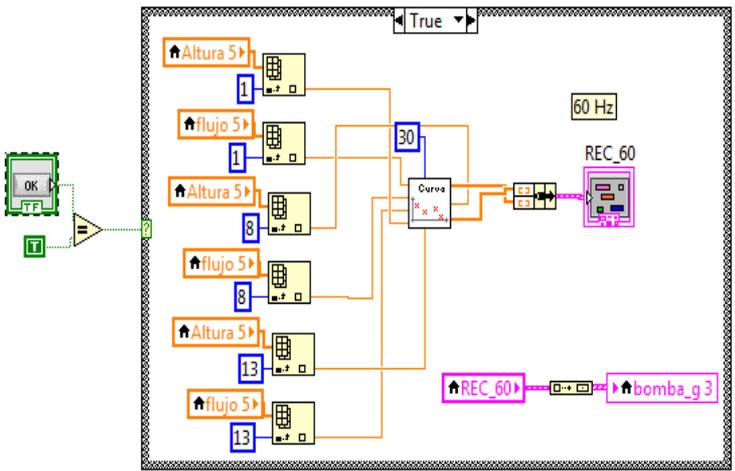
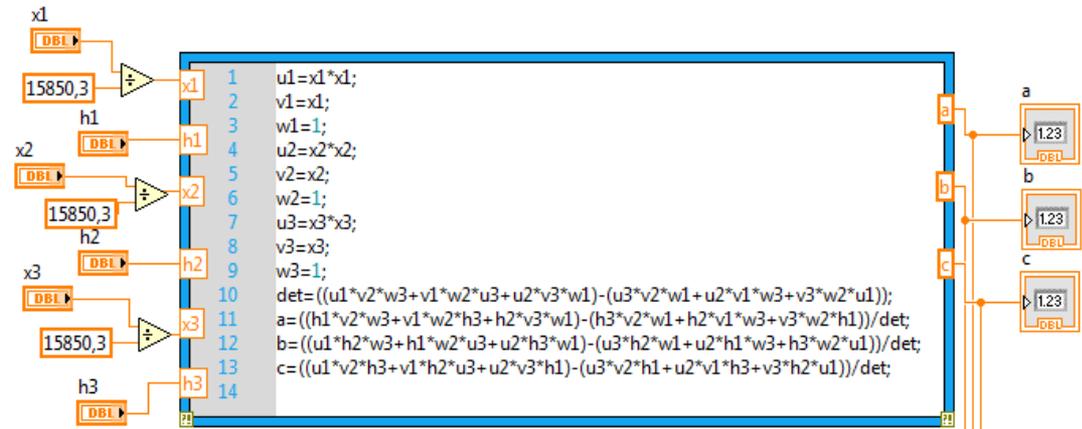
Los coeficientes A, B y C pueden ser calculados tomando tres puntos (Q,  $H_m$ ) de la curva del fabricante y resolviendo la ecuación para cada uno de ellos.

# Programación de LabVIEW

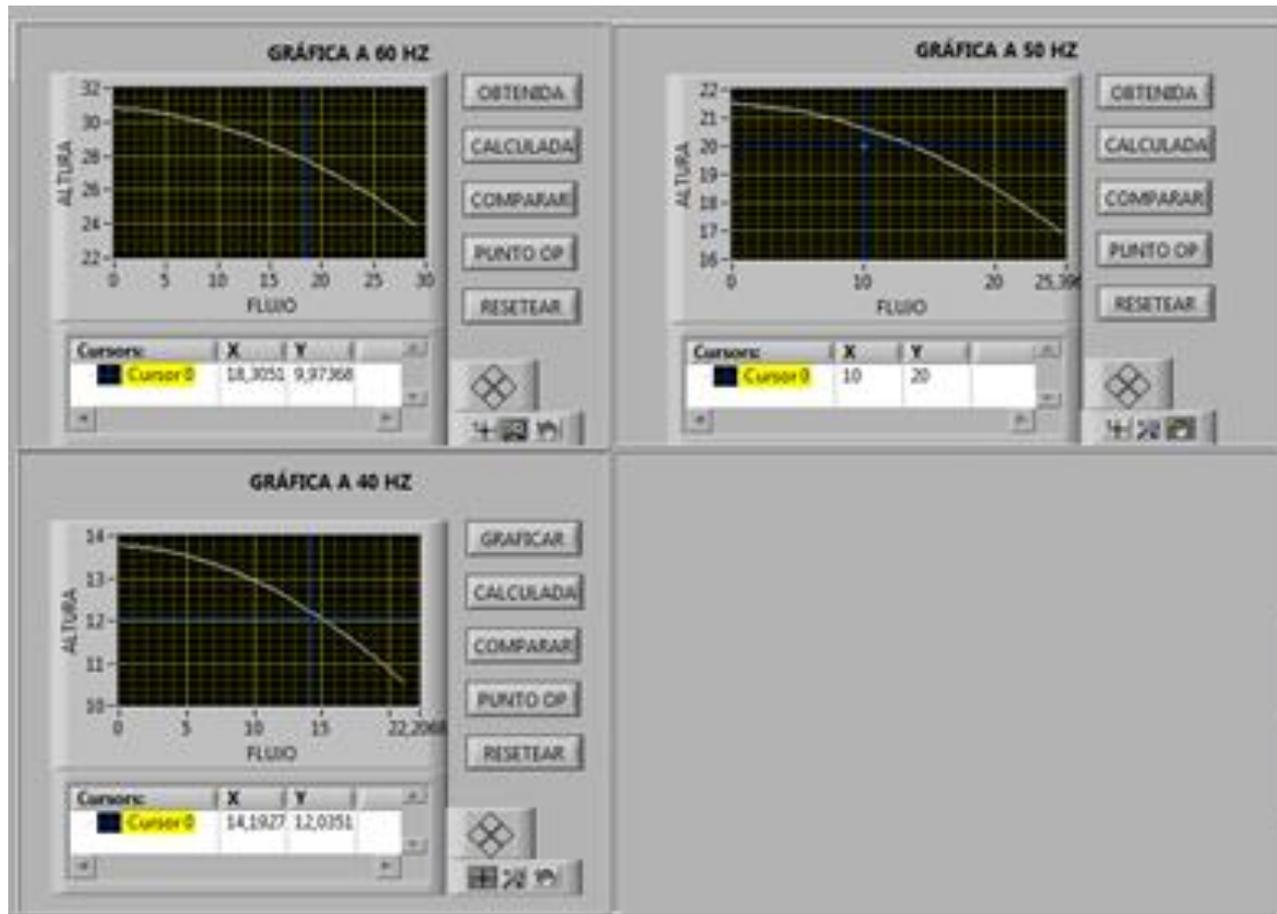
Programa principal



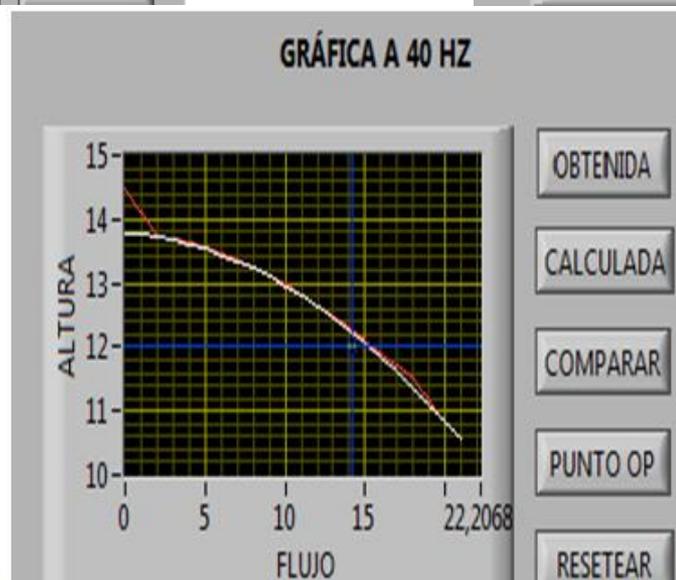
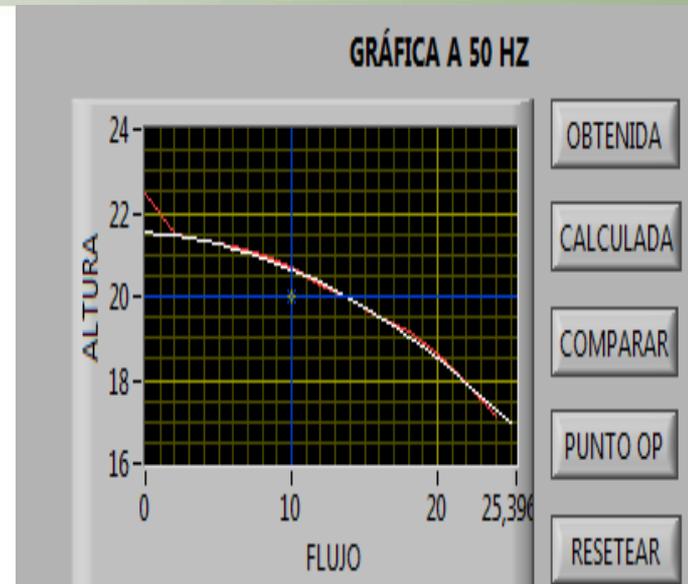
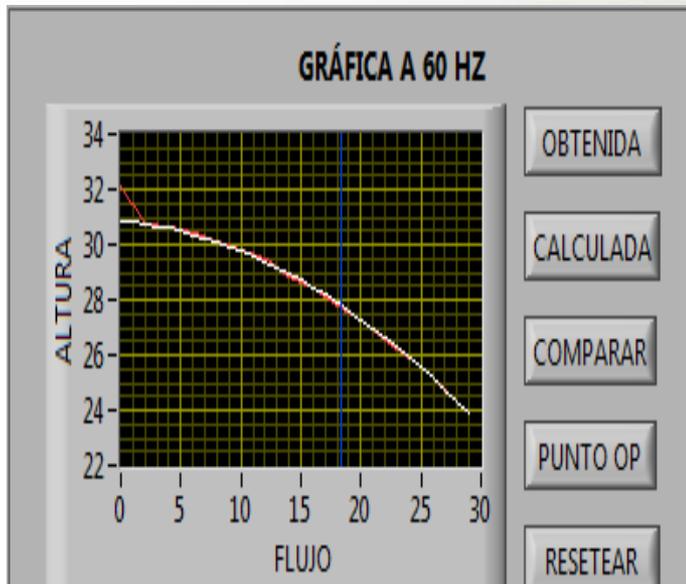
Sub VI



# Programación de LabVIEW



# COMPARACIÓN DE LAS CURVAS



# CURVA DEL SISTEMA

La altura de bombeo requerida por el sistema es igual a la elevación que la bomba le debe proporcionar al fluido más las pérdidas de carga en todo el sistema.

La altura total requerida por el sistema aumenta a medida que el caudal aumenta.

Sobre la curva del sistema se pueden tener distintos puntos de operación si se cambia la velocidad de funcionamiento de la bomba, ya que se modifica la curva de la bomba y se desplaza la intersección de las curvas

# CURVA DEL SISTEMA

Para la obtención de la curva del sistema se parte de la conservación de energía teniendo en cuenta la ecuación.

$$H_m = H_T = \left( \sum f_i \frac{l_i}{d_i} + \sum k_{mi} \right) \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Donde:

HT= desnivel geométrico total

f= Factor fricción

l= Distancia de la tubería

km= Pérdidas en tubería y accesorios.

Q= Caudal.

g= Gravedad.

A= Área de la tubería.

La forma final de la ecuación depende de las características físicas de la tubería (longitud accesorios diámetro, rugosidad absoluta, etc.).

# CÁLCULO DE LA FRICCIÓN

El coeficiente  $f$  recibe el nombre de factor de fricción, que depende por un lado de las condiciones hidrodinámicas del flujo, expresadas a través del número de Reynolds y por otro lado depende del estado de la superficie de la conducción que está en contacto con el fluido, a través de la rugosidad relativa.

Para el cálculo de la fricción se utiliza la fórmula de Swamee y Jain (1976) que se muestra en la ecuación.

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log_{10} \left( \frac{5,74}{Re^{0,9}} + \frac{\varepsilon_r}{3,7} \right) \right]^2}$$

Donde:

Re= Número de Reynolds

$\varepsilon_r$ = Rugosidad relativa

# CÁLCULO DE LA FRICCIÓN

Para calcular la rugosidad relativa se utiliza la primera ecuación y para el número de Reynolds la segunda ecuación .

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

Donde:

$\varepsilon$ = Rugosidad absoluta (1,5E-6 m)

D= Diámetro

$$Re = \frac{Q \times D}{A \times v}$$

Donde:

Q= Caudal

D= Diámetro

A= Área

v= Viscosidad del agua (1,007E-6 m<sup>2</sup>/s)

# CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS

Los elementos accesorios son imprescindibles en toda red de tuberías, entre ellos se incluyen los que permiten acomodar el trazado de toda red a los accidentes topográficos del terreno (codos, juntas), otros que permiten empalmar y derivar tuberías (tes, collarines, uniones en Y) y también los dispositivos de control del flujo (válvulas de compuerta, lenteja o mariposa, estrechamientos).

**Codo 90°:**  $k=1,8$ .

**Válvula de Globo y compuerta:**  $k=0,2$ .

**Tee:**  $k=1,8$

**Entrada de depósito:**  $k=1$

**Ensanchamiento brusco:**

$$k = \left[ 1 - \left( \frac{D1}{D2} \right)^2 \right]^2$$

**Contracción brusca:**

$$k = 0,5 \left[ 1 - \left( \frac{D2}{D1} \right)^2 \right]$$

$D1$  = Diámetro inicial y  $D2$  = Diámetro final

# CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS

CANTIDAD	ACCESORIO	DIÁMETRO (PULGADAS)		K <sub>m</sub>	K <sub>m</sub> Total
		INICIAL	FINAL		
7	Codos	3/4	3/4	1,800	12,600
2	Válvula de Globo	3/4	3/4	0,200	0,400
1	Válvula de Compuerta	3/4	3/4	0,200	0,200
1	Tee	1 1/4	1 1/4	1,800	1,800
2	Entrada al tanque	3/4	3/4	1,000	2,000
1	Ensanchamiento brusco	3/4	1 1/2	0,563	0,563
1	Ensanchamiento brusco	3/4	1 1/4	0,410	0,410
1	Contracción brusca	1	3/4	0,605	0,605
1	Contracción brusca	1 1/4	3/4	3,160	3,160
				TOTAL	21,738

# Programación de LabVIEW

## Programa principal

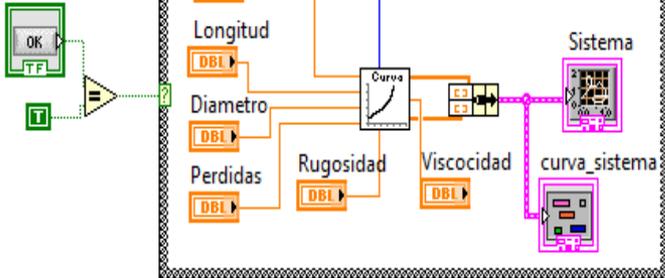
### CÁLCULO CURVA DEL SISTEMA

#### DATOS

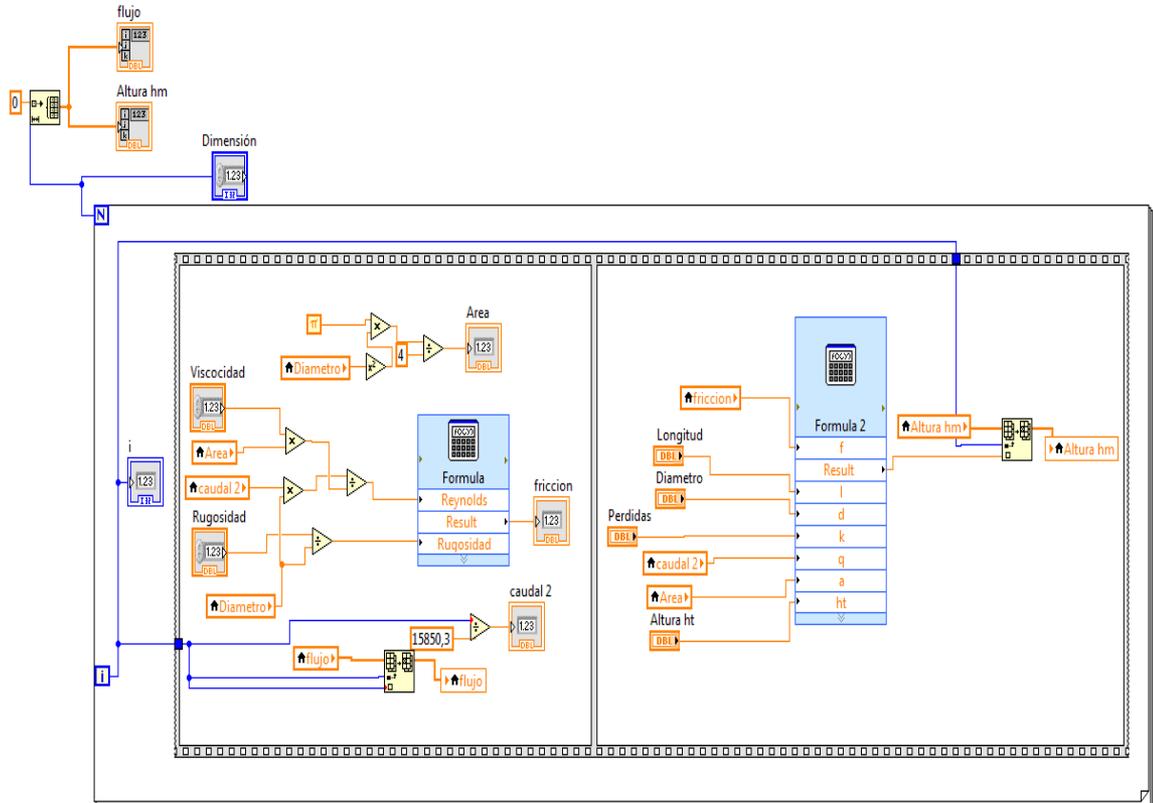
ALTURA	0,63 (m)	PÉRDIDAS	0 ( )
DIAMETRO	0,01905 (m)	RUGOSIDAD	1,5E-6 (m)
LONGITUD	3,615 (m)	VISCOSIDAD	1,007E-6 (m <sup>2</sup> /s)

#### CURVA SISTEMA

Graficar Sistema

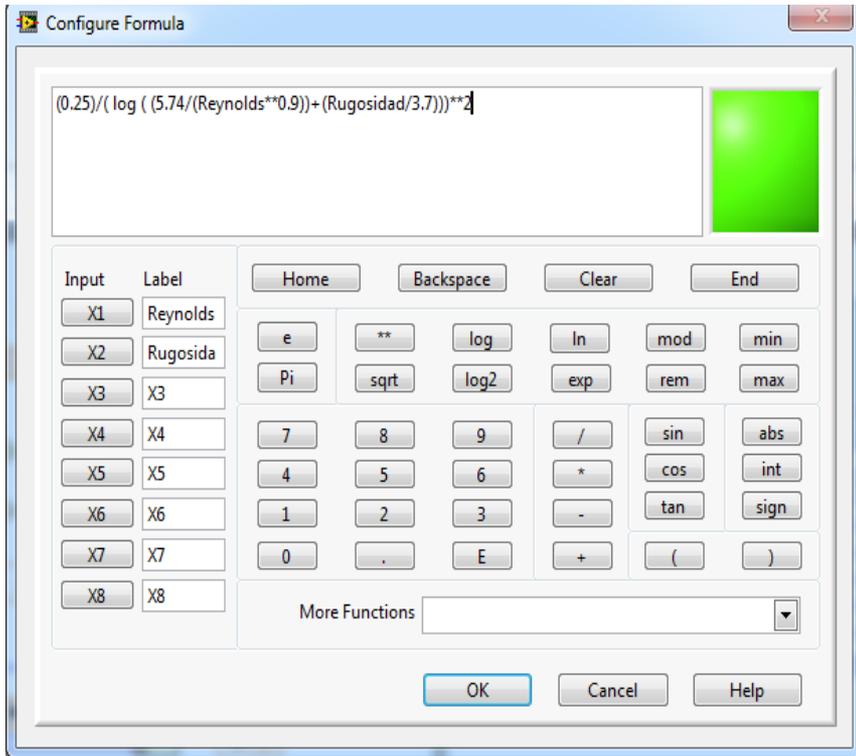


## Sub VI

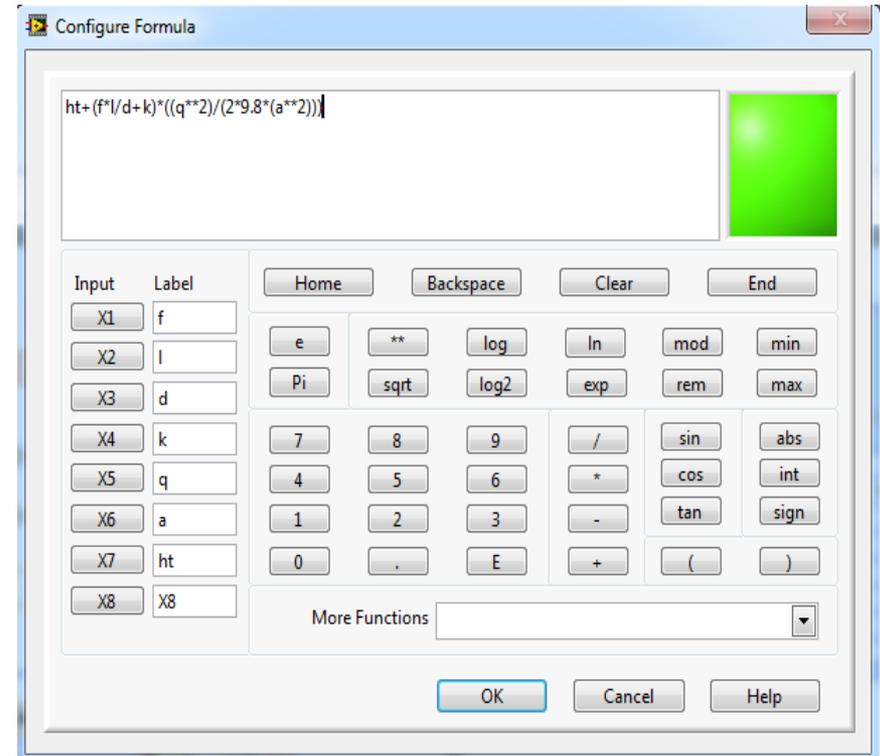


# Programación de LabVIEW

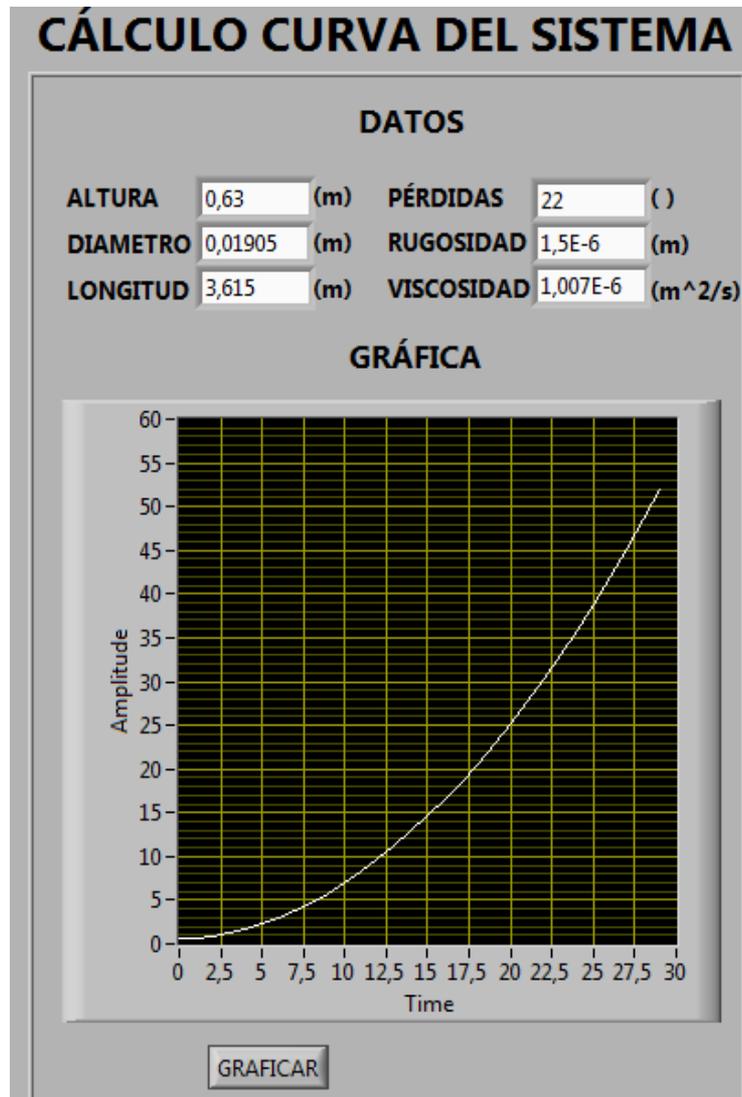
Cálculo de la fricción



Cálculo para la curva del sistema



# Programación de LabVIEW

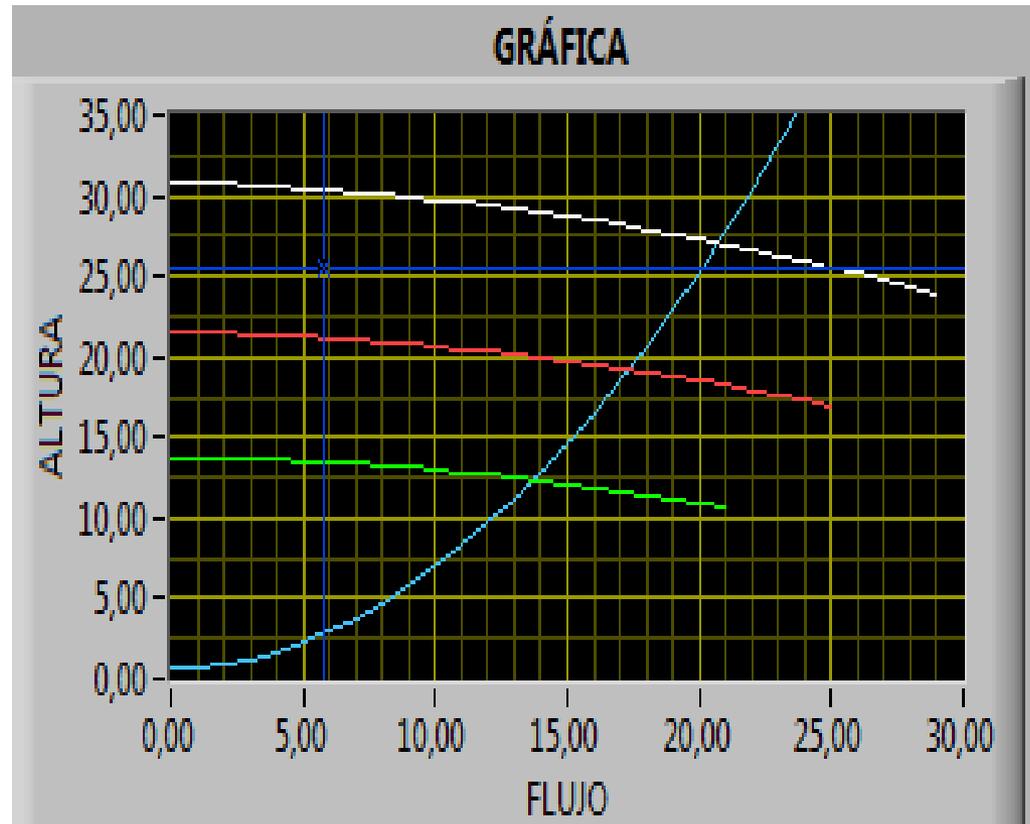


# PUNTO DE OPERACIÓN

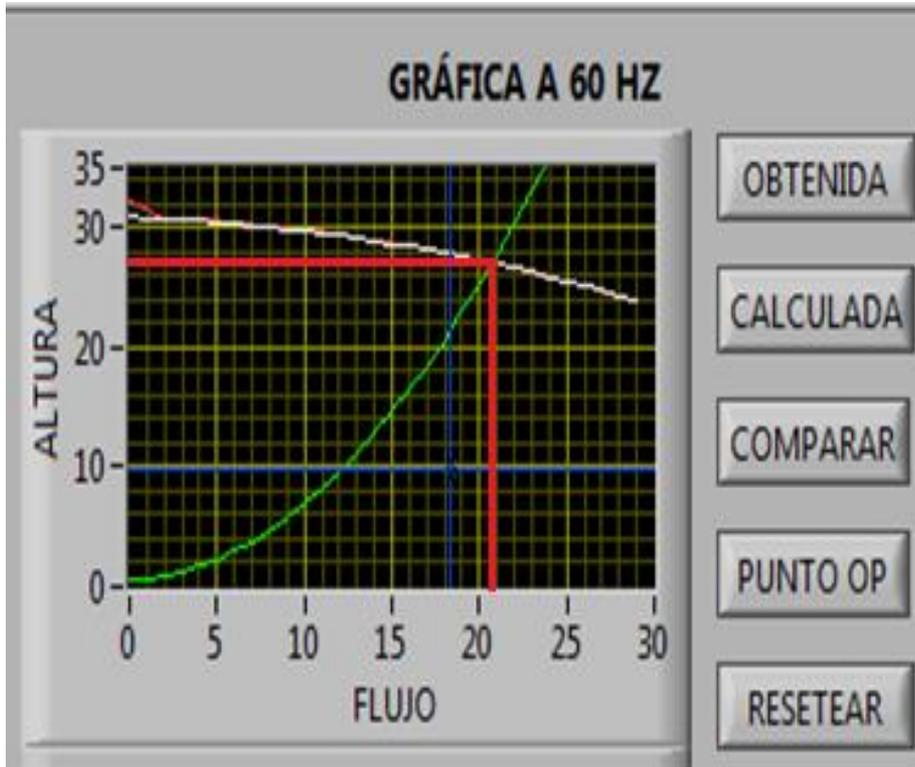
El punto de operación de la bomba centrífuga es la intersección entre las curvas del sistema y de la bomba, en donde el comportamiento de la bomba y del caudal se acoplan de mejor manera.

El punto de operación se lo determina para tener una mayor eficiencia en el funcionamiento de la misma, un ahorro de energía y prolongar la vida útil de la bomba.

# Programación de LabVIEW



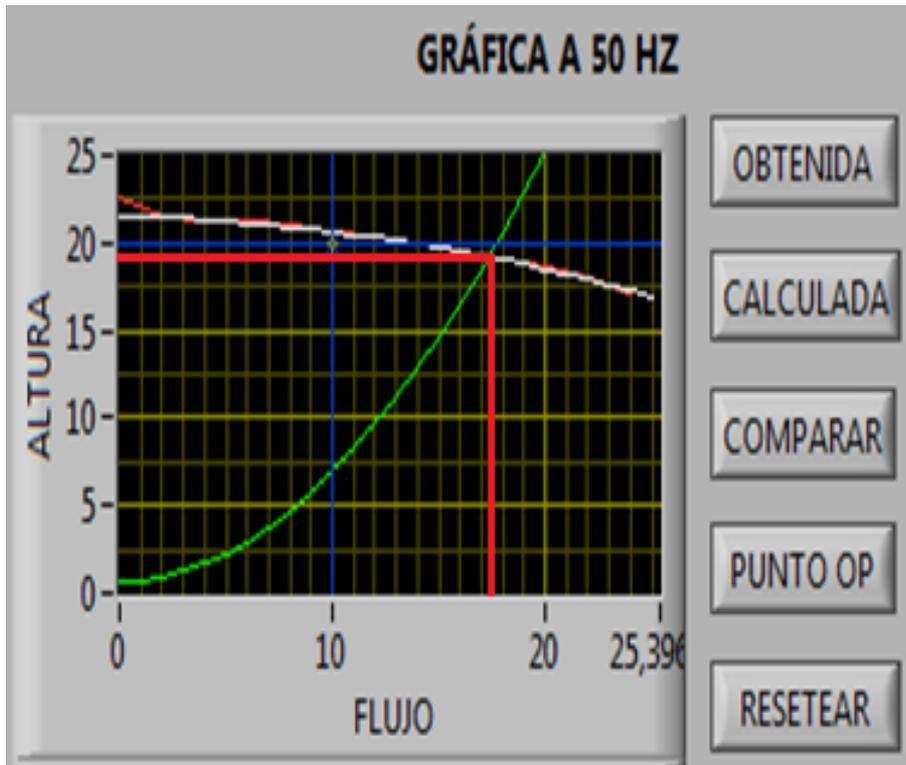
# PUNTO DE OPERACIÓN A 60 HZ



La bomba centrífuga a 60 Hz trabaja con un flujo de 28 GPM y una altura de 24 m, al encontrar el punto de operación el flujo es de 20,8 GPM y la altura es de 27 m.

Para que la bomba centrífuga trabaje a su máximo rendimiento se tiene que cerrar la válvula V 2.1 o V 2.2 hasta llegar a tener un flujo de 20,8 GPM circulando por la tubería.

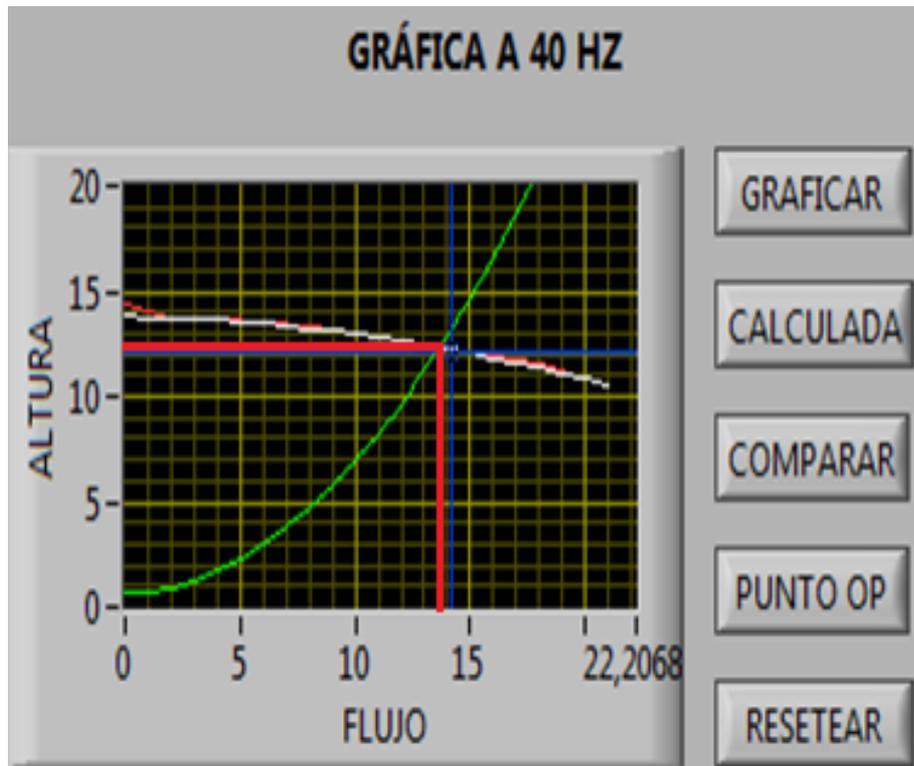
# PUNTO DE OPERACIÓN A 50 HZ



La bomba centrífuga a 50 Hz trabaja con un flujo de 24 GPM y una altura de 17,5 m, al encontrar el punto de operación el flujo es de 17,2 GPM y la altura es de 19 m.

Para que la bomba centrífuga trabaje a su máximo rendimiento se tiene que cerrar la válvula V 2.1 o V 2.2 hasta llegar a tener un flujo de 17,2 GPM circulando por la tubería.

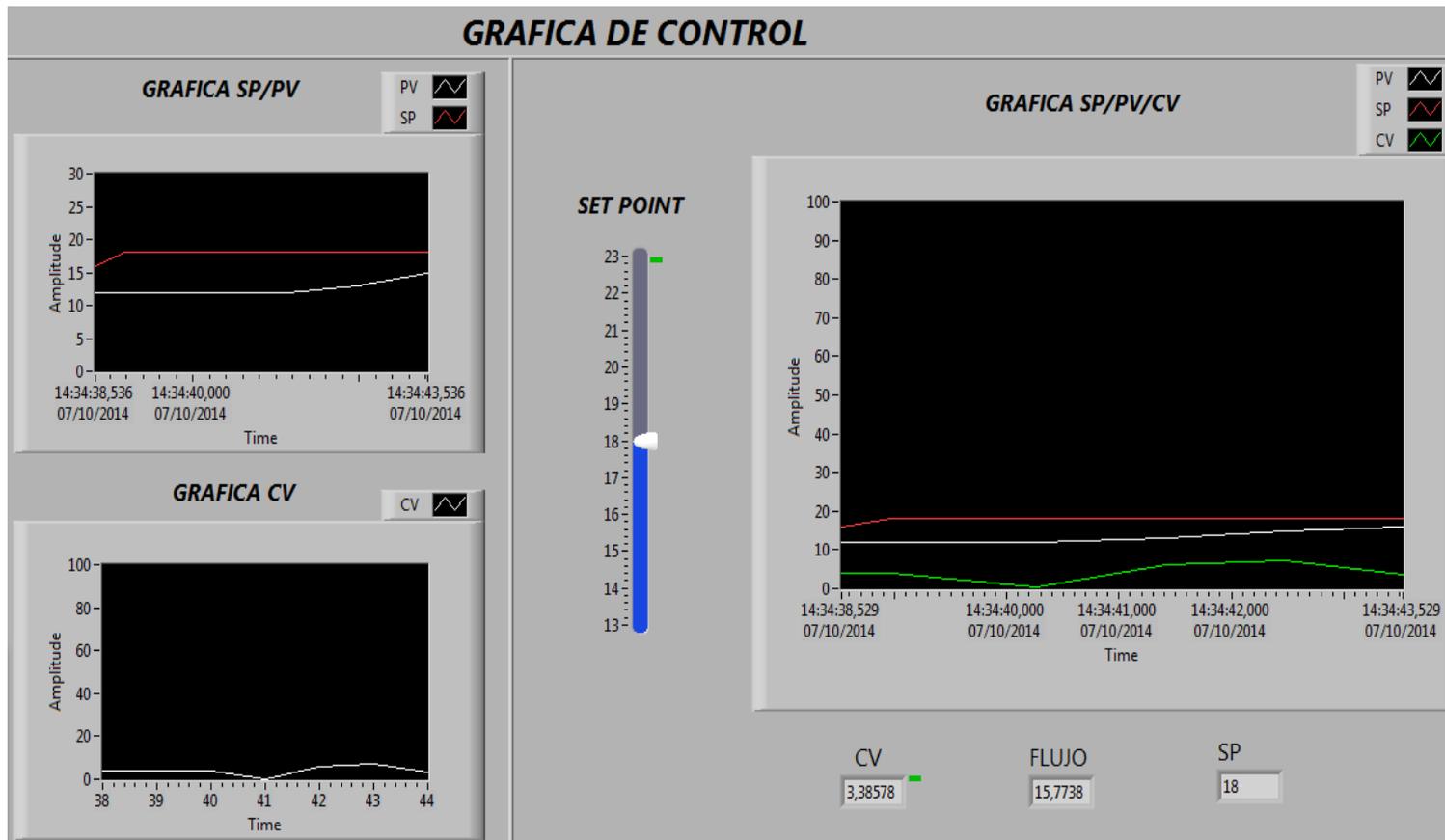
# PUNTO DE OPERACIÓN A 40 HZ



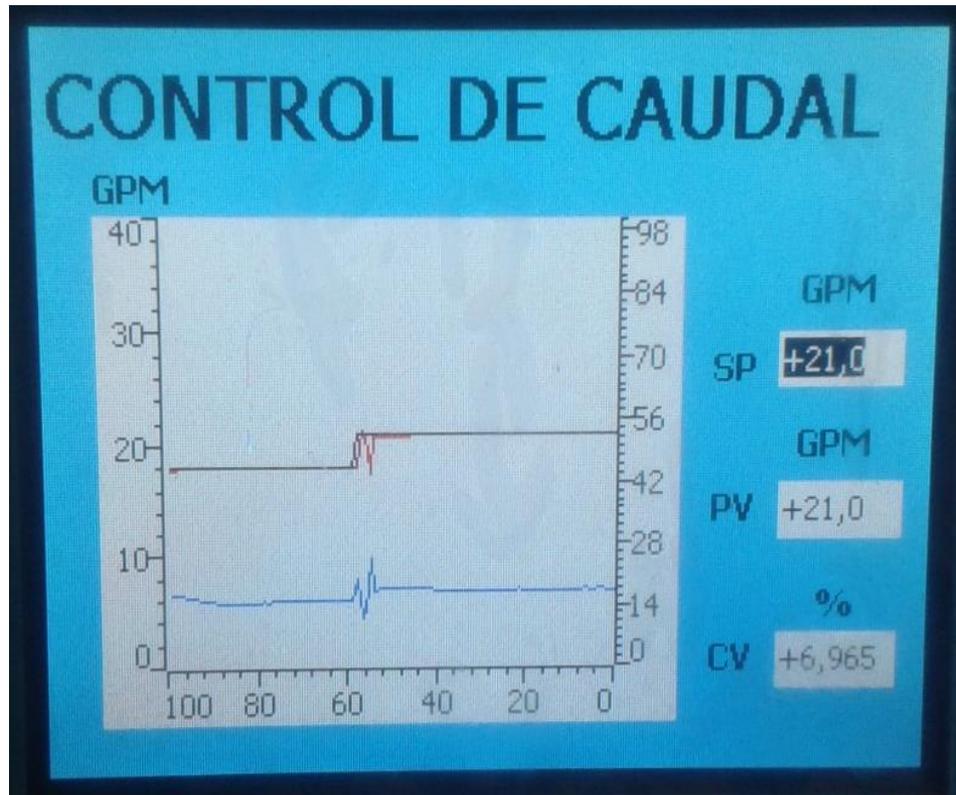
La bomba centrífuga a 40 Hz trabaja con un flujo de 20 GPM y una altura de 11 m, al encontrar el punto de operación el flujo es de 13,9 GPM y la altura es de 12,4 m

Para que la bomba centrífuga trabaje a su máximo rendimiento se tiene que cerrar la válvula V 2.1 o V 2.2 hasta llegar a tener un flujo de 13,9 GPM circulando por la tubería.

# CONTROL DE CAUDAL POR VARIADOR



# CONTROL DE CAUDAL POR VARIADOR



# CONCLUSIONES

- En el banco de pruebas para bombas centrifugas desarrollado intervienen algunos campos de la ingeniería como son: Control de Procesos, Sistemas SCADA, Redes Industriales, Instrumentación Virtual e Instrumentación Industrial.
- Mediante el uso de la guía de prácticas propuesta del banco de pruebas para bombas centrifugas, el estudiante tendrá una mejor comprensión y entendimiento sobre el funcionamiento de las bombas centrifugas y transmisores industriales; y de esta manera afianzar sus conocimientos en éstas aplicaciones tan importantes en el ámbito industrial.
- La bomba centrífuga es controlada por el Variador de Frecuencia Sinamics G110, el cuál varía la frecuencia de acuerdo a la señal análoga ingresada ya sea desde el potenciómetro o el PLC.

# CONCLUSIONES

- La variable caudal es registrada por el transmisor de flujo Signet Flow, su medición es proporcional a la frecuencia del variador, es decir a mayor frecuencia mayor caudal y a menor frecuencia menor caudal.
- Para comunicar los datos entre el PLC S7-1200, la TOUCH PANEL KTP600 y el computador, es necesario crear una red Ethernet y subir los tag's a un servidor OPC.
- Al disminuir la frecuencia en el variador, el caudal disminuye al igual que la cabeza total (altura) en la curva de la bomba, la curva del sistema permanece constante.
- Al aumentar la frecuencia en el variador, el caudal aumenta al igual que la cabeza total (altura) en la curva de la bomba, la curva del sistema permanece constante.

# CONCLUSIONES

- Al cerrar completamente la válvula V 2.1 ó V 2.2 la presión ejercida sobre los sensores aumenta considerablemente ya que la bomba trabaja a su máxima potencia intentando impulsar al caudal, esto genera un desvío en la curva de la bomba, para lo cual se realizó el procesamiento de los datos generando una curva con un mayor número de puntos y eliminando el desvío del primer valor de la curva.
- El punto de intersección entre la curva de la bomba y la curva del sistema (punto de operación), en las tres frecuencias experimentadas de 40, 50 y 60 Hz, indica que el banco de pruebas de bombas centrífugas debe funcionar a un menor caudal del que se encuentra operando, para ello se tiene que cerrar la válvula V 2.1 o V 2.2 hasta que el caudal se encuentre en el punto de operación.

# RECOMENDACIONES

- Para utilizar el banco de pruebas de bombas centrífugas y entender cómo se obtienen las curvas de las bombas, se requiere leer temas sobre bombas centrífugas y sus curvas características, además seguir la guía de prácticas para que las conexiones sean óptimas, también se requiere leer el manual de fallas que se encuentra en los anexos para poder resolver posibles fallos que se generen.
- Verificar que todas las válvulas se encuentren abiertas ya que si están cerradas se está forzando a la bomba.
- Realizar correctamente las conexiones del panel lateral, ya que si los transmisores no se encuentra en un lazo de alimentación, estos no se encenderán y se generara una falla en el módulo de entradas y salidas analógicas SM 1234.

# RECOMENDACIONES

- Realizar cambios ocasionales del agua en el tanque ya que por estar sometido a pruebas se pueden generar impurezas (oxidación y desgaste de tubería) que a su vez puedan ocasionar el mal funcionamiento del banco de pruebas de bombas centrífugas.
- Para realizar la toma de datos de la curva de la bomba, al cerrar completamente la válvula V 2.1 o V 2.2, se requiere desconectar y conectar instantáneamente al transmisor de flujo para que la medición se ponga rápidamente en cero, ya que si no se lo realiza, el transmisor está configurado para realizar el promediado de los datos y se demora en ponerse en el valor de cero a pesar que el sensor no detecte ningún cambio en el caudal.

# GRACIAS