



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



## “REPOTENCIACIÓN DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DE CAUDAL MEDIANTE ESTRANGULAMIENTO”

SALAZAR VILLACÍS PABLO JOSÉ  
SILVA SALINAS MARCELO JAVIER



# Agenda

- Objetivos
- Descripción del proyecto
- Desarrollo del proyecto
- Pruebas y análisis de resultados
- Alcances y Limitaciones
- Conclusiones y recomendaciones

# Objetivo General

Repotenciar el sistema de entrenamiento de bombas centrífugas para la obtención de las curvas características del control de caudal mediante estrangulamiento.

## Objetivos Específicos

- Seleccionar los diferentes dispositivos a implementarse para la repotenciación del sistema de entrenamiento de bombas centrífugas.
- Adquirir los conocimientos necesarios de cada elemento que va a formar parte del sistema de entrenamiento de bombas centrífugas.
- Ensamblar los dispositivos en el sistema de entrenamiento con sus respectivas conexiones para un funcionamiento óptimo.
- Diseñar el diagrama P&ID del sistema de entrenamiento con todos los parámetros y normas respectivas.

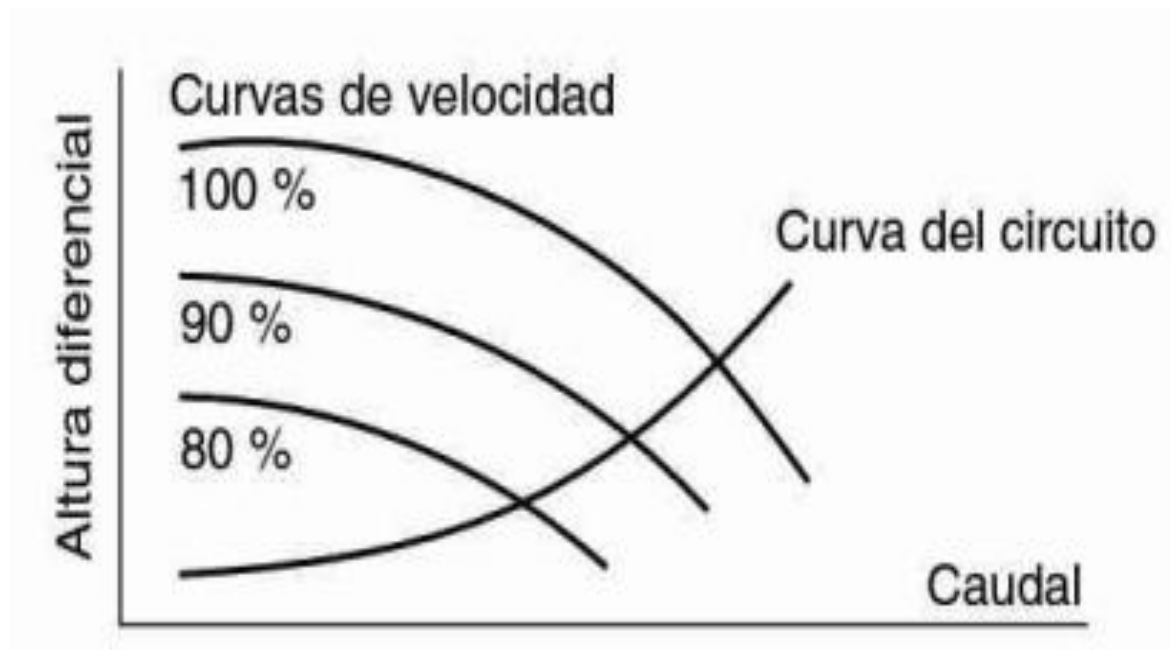
## Objetivos Específicos

- Realizar los algoritmos de programación necesarios para la obtención de las curvas características del control de caudal mediante estrangulamiento (válvula de control) y frecuencia variable, así como obtener las curvas de eficiencia de la bomba centrífuga.
- Diseñar el HMI para ver el estado del sistema.
- Realizar las pruebas y observar el comportamiento del sistema.
- Comparar la potencia consumida de los sistemas variador-motor-bomba vs válvula neumática proporcional.

# Descripción del proyecto

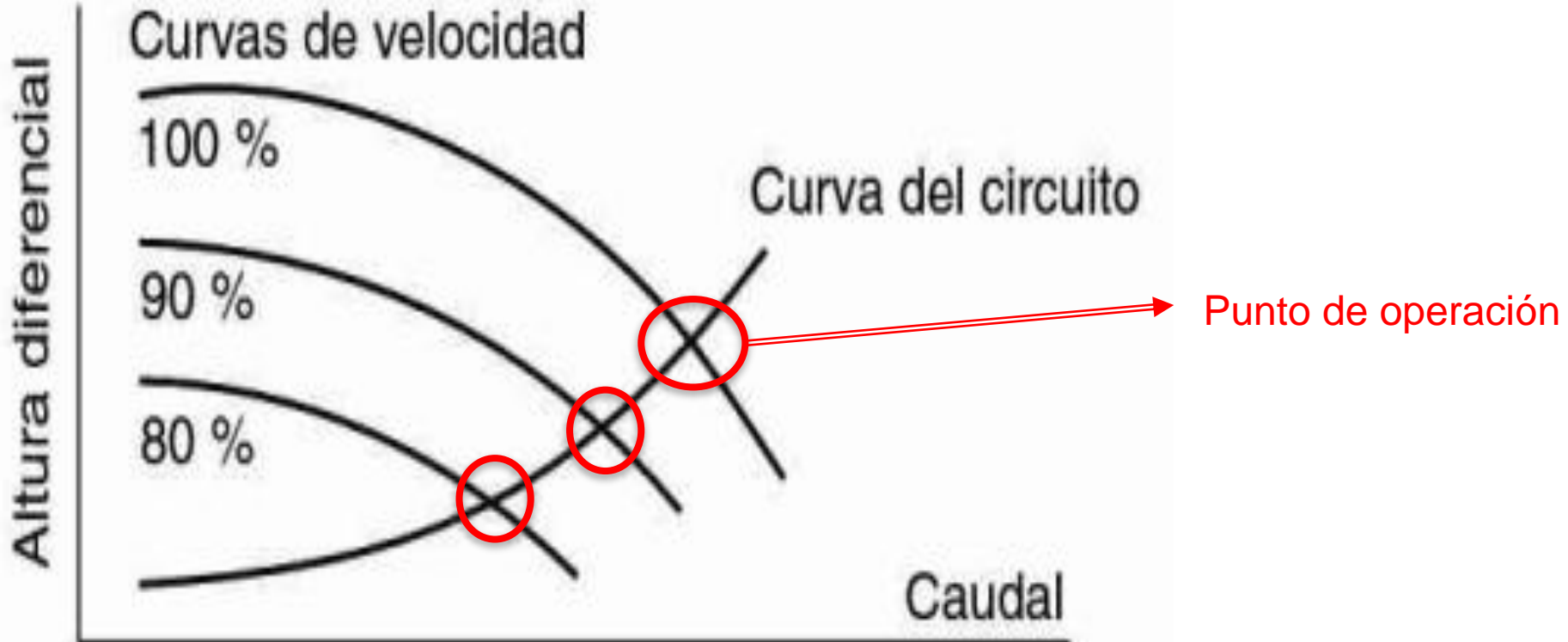
## Planteamiento del problema

Curvas características del control de caudal mediante el método de variador de frecuencia



# Descripción del proyecto

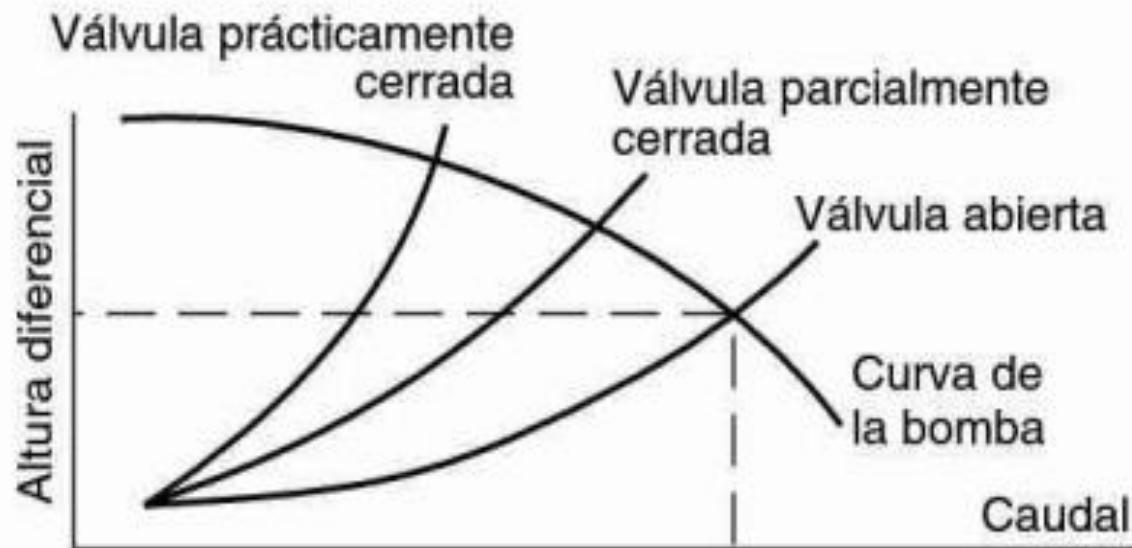
## Planteamiento del problema



# Descripción del proyecto

## Planteamiento del problema

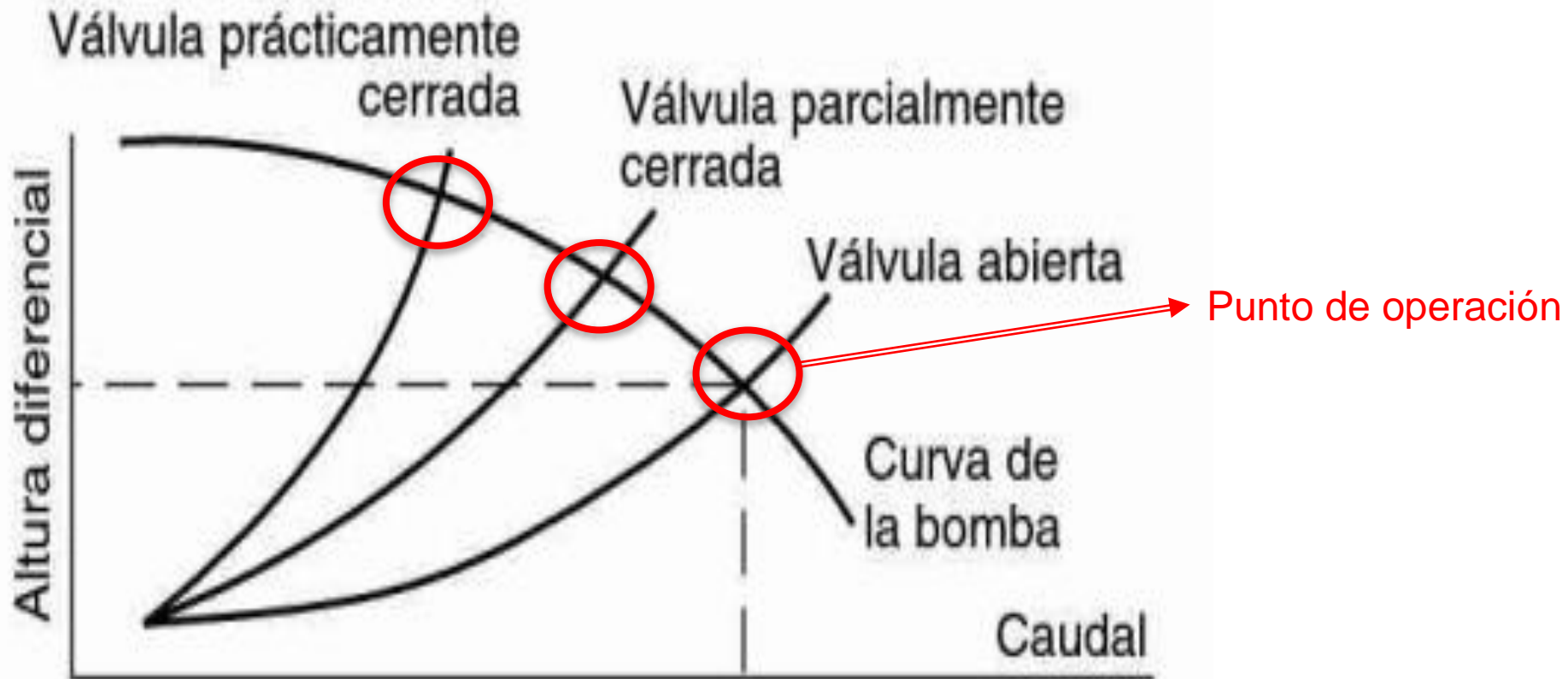
Curvas características del control de caudal mediante el método de estrangulamiento





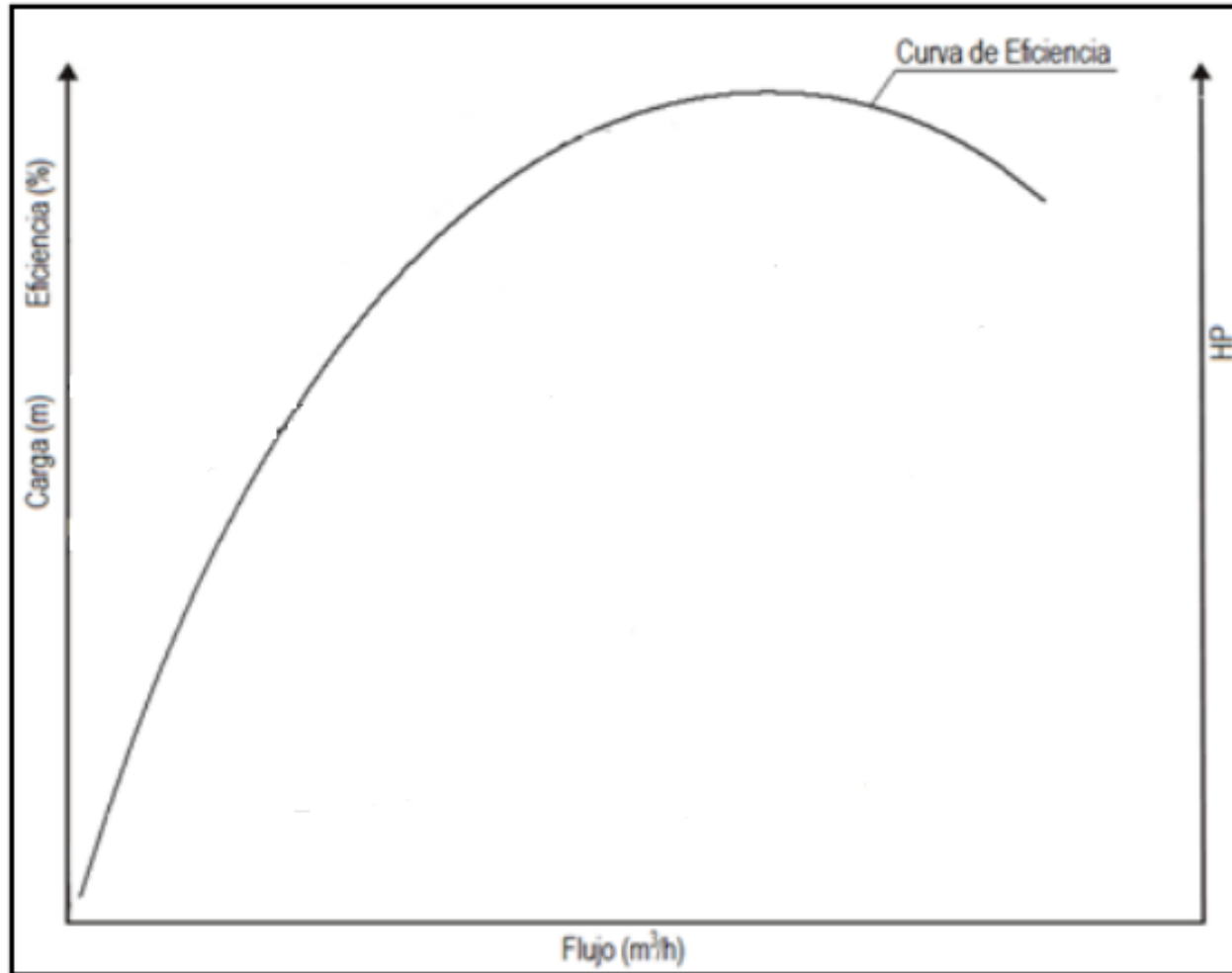
# Descripción del proyecto

## Planteamiento del problema



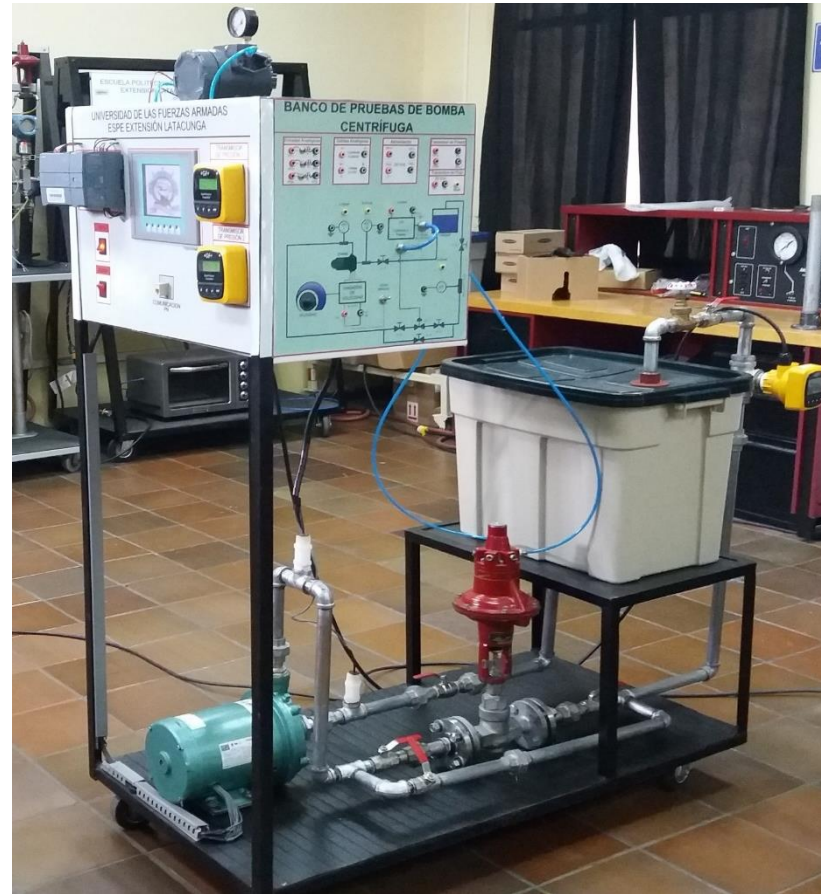
# Descripción del proyecto

## Planteamiento del problema



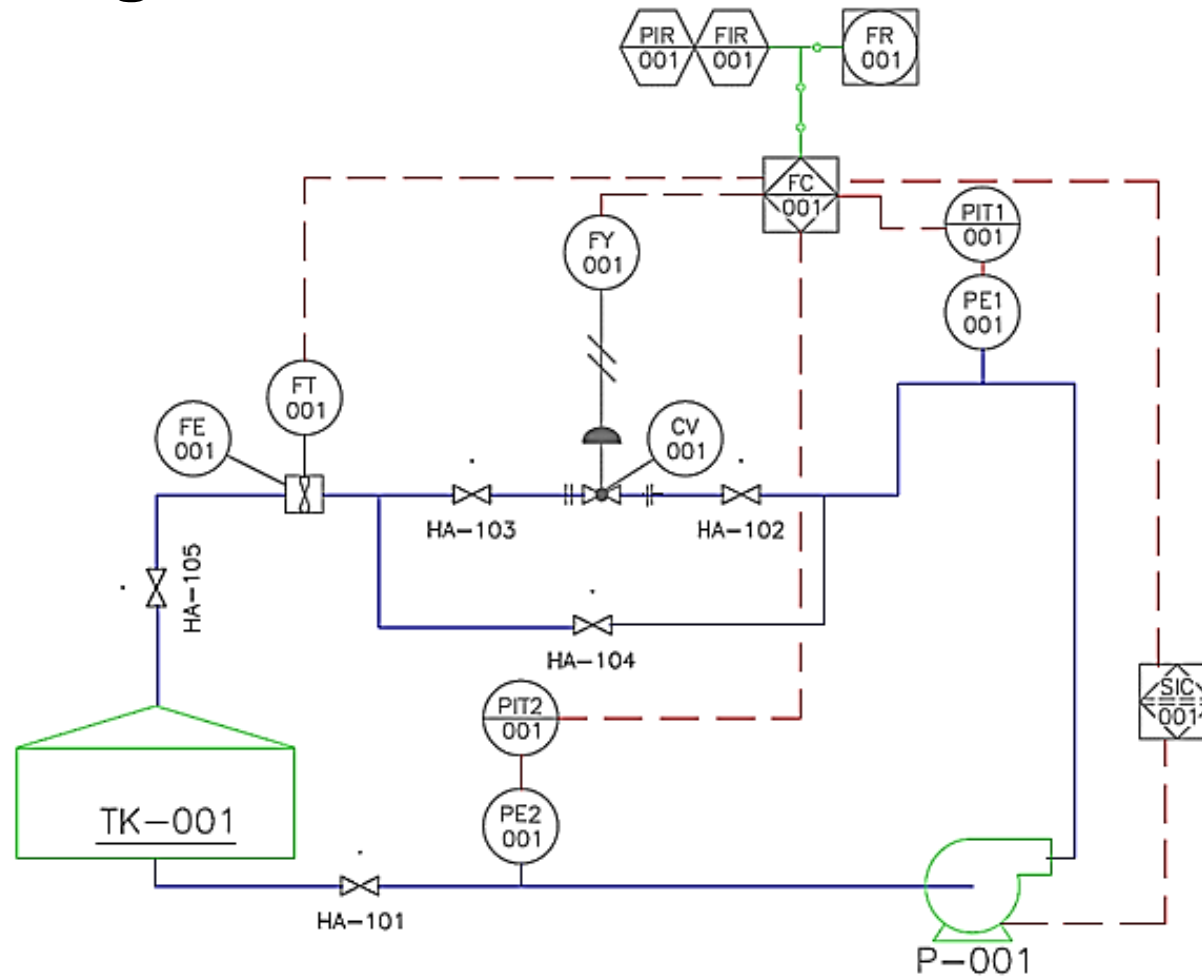
# Desarrollo del proyecto

## Banco de pruebas de bomba centrífuga



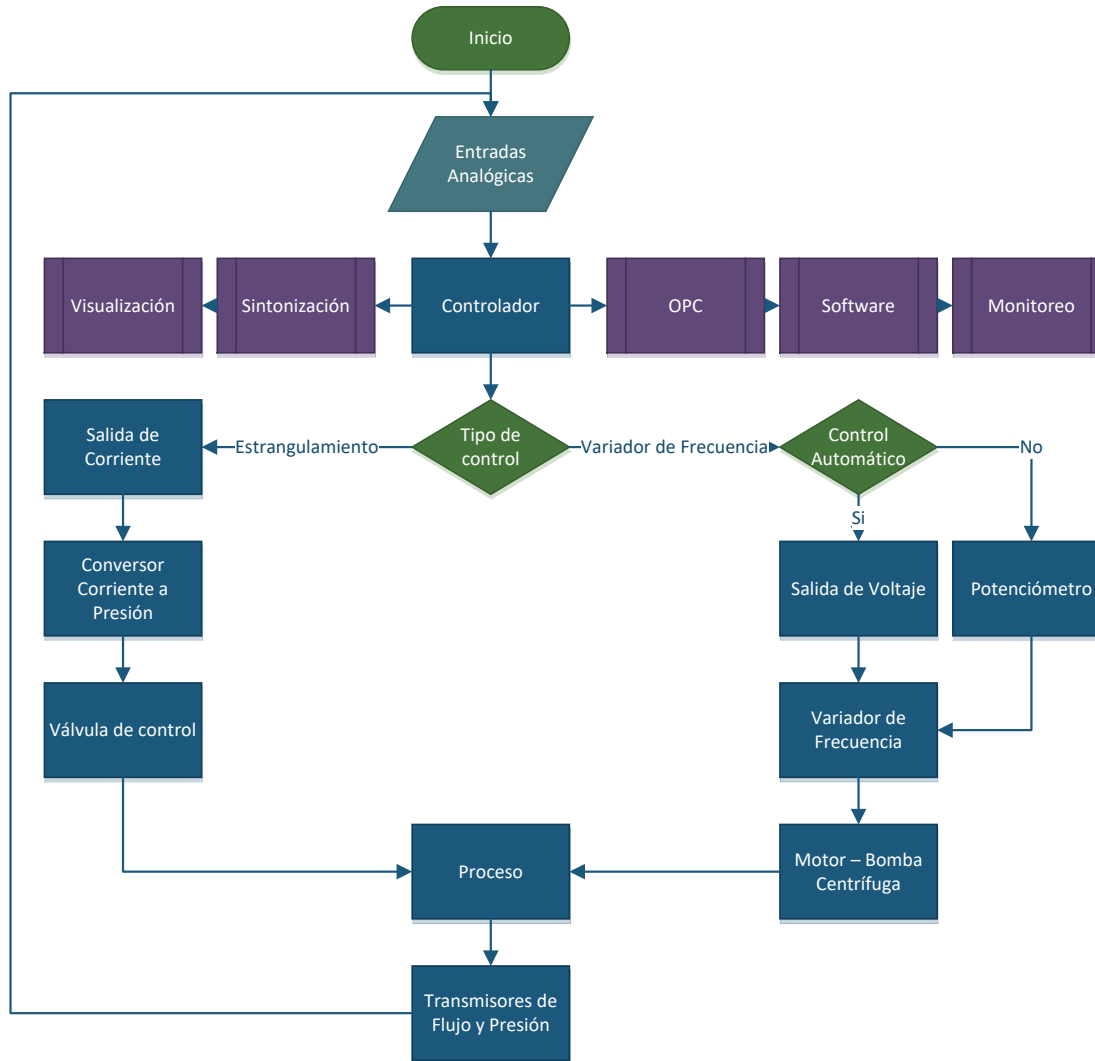
# Desarrollo del proyecto

## Diagrama P&ID



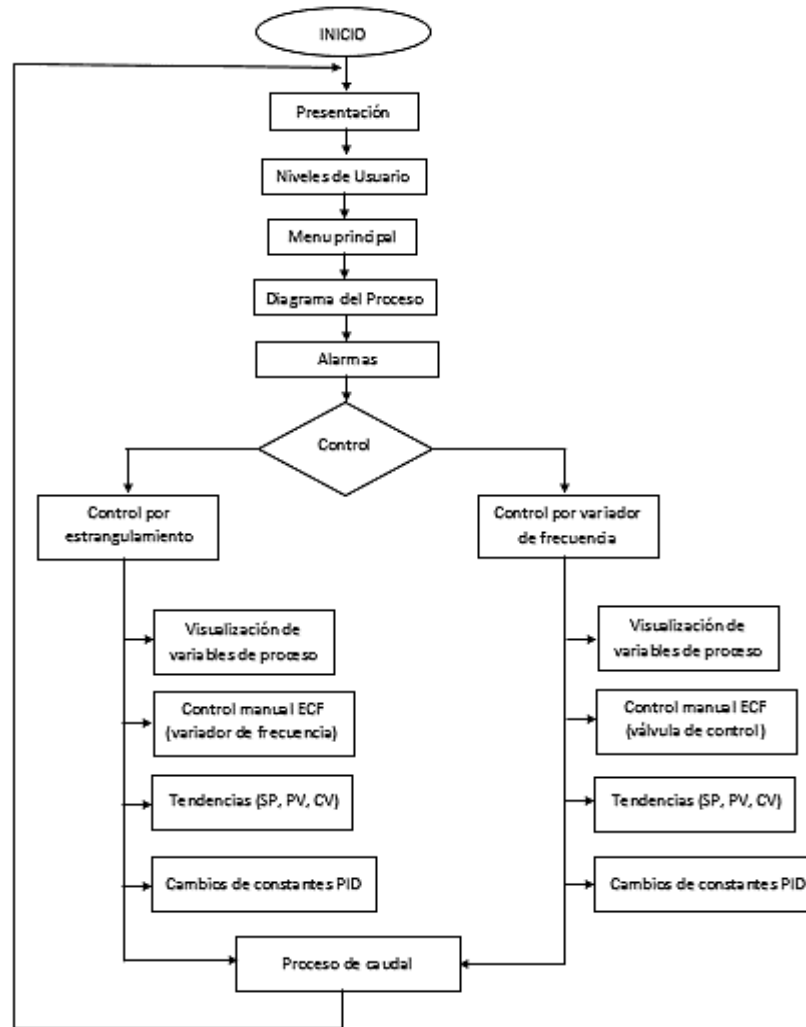
# Desarrollo del proyecto

## Diagrama de flujo del controlador



# Desarrollo del proyecto

## Diagrama de flujo de la TOUCH PANEL



# Desarrollo del proyecto

## Programación LabView – Pantalla inicial

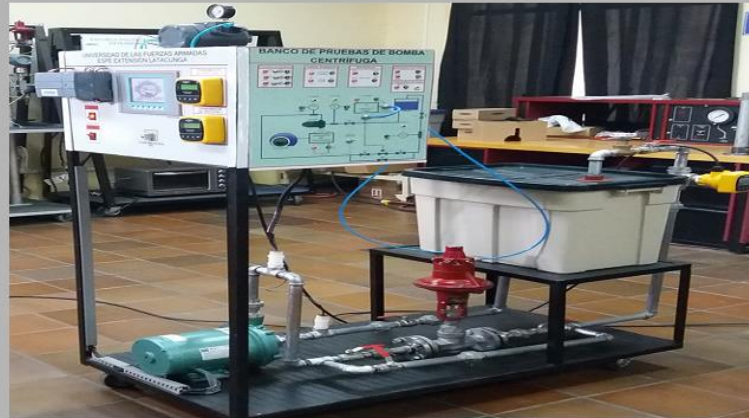


UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE  
EXTENSIÓN LATACUNGA



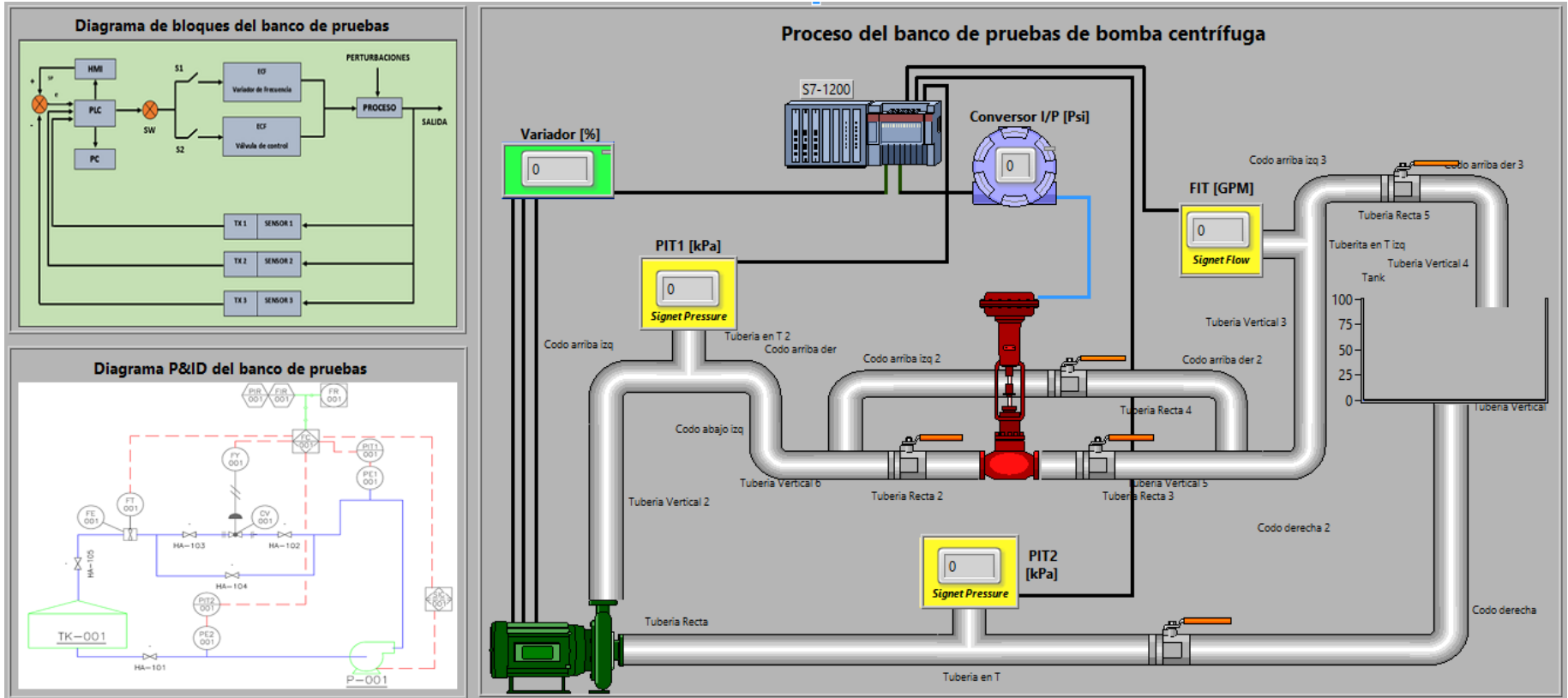
INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

**BANCO DE PRUEBAS DE BOMBA CENTRÍFUGA PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS  
DEL CONTROL DE CAUDAL POR VARIADOR DE FRECUENCIA Y ESTRANGULAMIENTO**



# Desarrollo del proyecto

## Programación LabView – Pantalla diagrama de bloques y P&ID





# Desarrollo del proyecto

## Programación LabView – Pantalla obtención de datos control de frecuencia

The screenshot displays a LabView interface for frequency control and data acquisition. It is organized into several main sections:

- FRECUENCIA A 60 HZ, 50 HZ, 40 HZ, 30 HZ, 20 HZ:** Five vertical columns, each containing 15 digital readout (DIO) displays, all currently showing '0'. Each column is labeled with its respective frequency.
- CONTROL:** A central control area featuring two sliders: 'Control por Estrangulamiento' (Choke Control) and 'Iniciar Control' (Start Control). Below these are two digital readouts: 'Caudal' (Flow) in GPM and 'Altura Diferencial' (Differential Height) in meters, both showing '0'.
- OBTENCIÓN DE DATOS (DATA ACQUISITION):** A panel on the right with five sub-sections, one for each frequency (60 Hz, 50 Hz, 40 Hz, 30 Hz, 20 Hz). Each sub-section contains 'DATOS' and 'RESETEAR' (Reset) buttons. Below these are 'RECUPERAR' (Recover) and 'GUARDAR' (Save) buttons. It also includes a 'Frecuencia Bomba' (Pump Frequency) dropdown menu set to '0 Hz', a 'Set Caudal' (Set Flow) dial set to '0 GPM', and an 'OFF' checkbox for 'Iniciar Datos Automático' (Automatic Data Acquisition).

# Desarrollo del proyecto

## Programación LabView – Pantalla obtención de datos control por estrangulamiento

**ESTRANGULAMIENTO A 15 psi**

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

**ESTRANGULAMIENTO A 12 psi**

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

**ESTRANGULAMIENTO A 9 psi**

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

**ESTRANGULAMIENTO A 6,5 psi**

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

**ESTRANGULAMIENTO A 5 psi**

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

**CONTROL**

Control por Variador de Frecuencia  Iniciar Control

Caudal  GPM

Altura diferencial  m

**OBTENCIÓN DE DATOS**

**ESTRANGULAMIENTO A 15 psi**

**ESTRANGULAMIENTO A 12 psi**

**ESTRANGULAMIENTO A 9 psi**

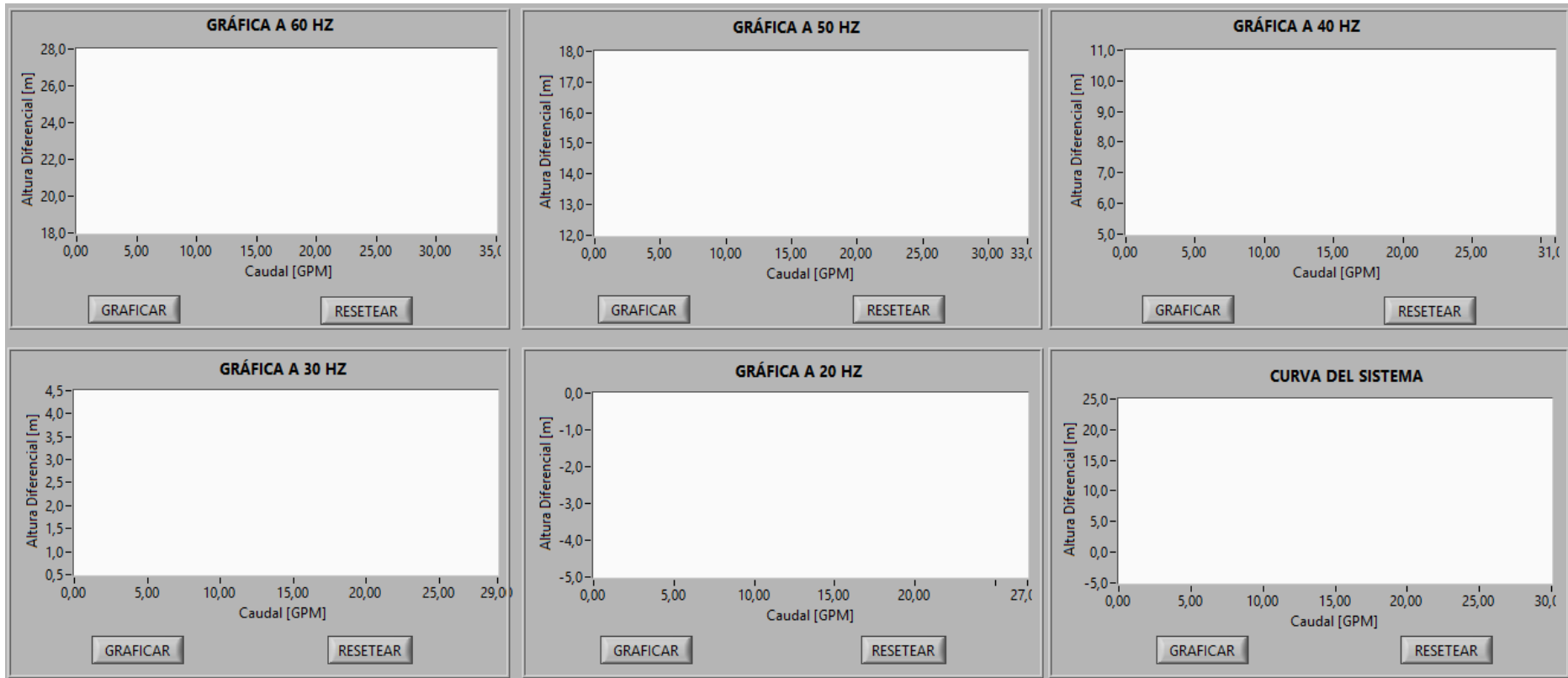
**ESTRANGULAMIENTO A 6,5 psi**

**ESTRANGULAMIENTO A 5 psi**

Estrangulamiento Válvula  psi

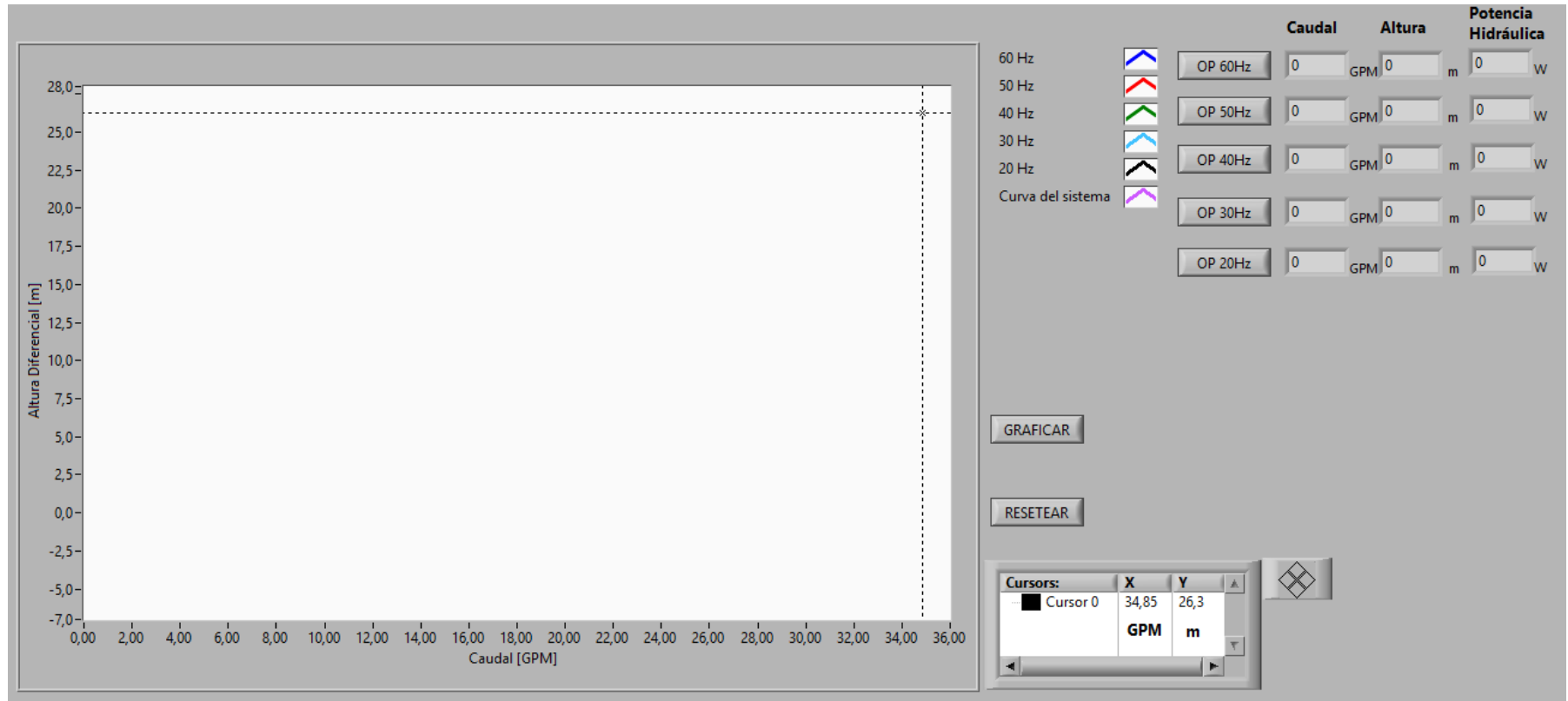
# Desarrollo del proyecto

## Programación LabView – Pantalla curvas características control por variador de frecuencia



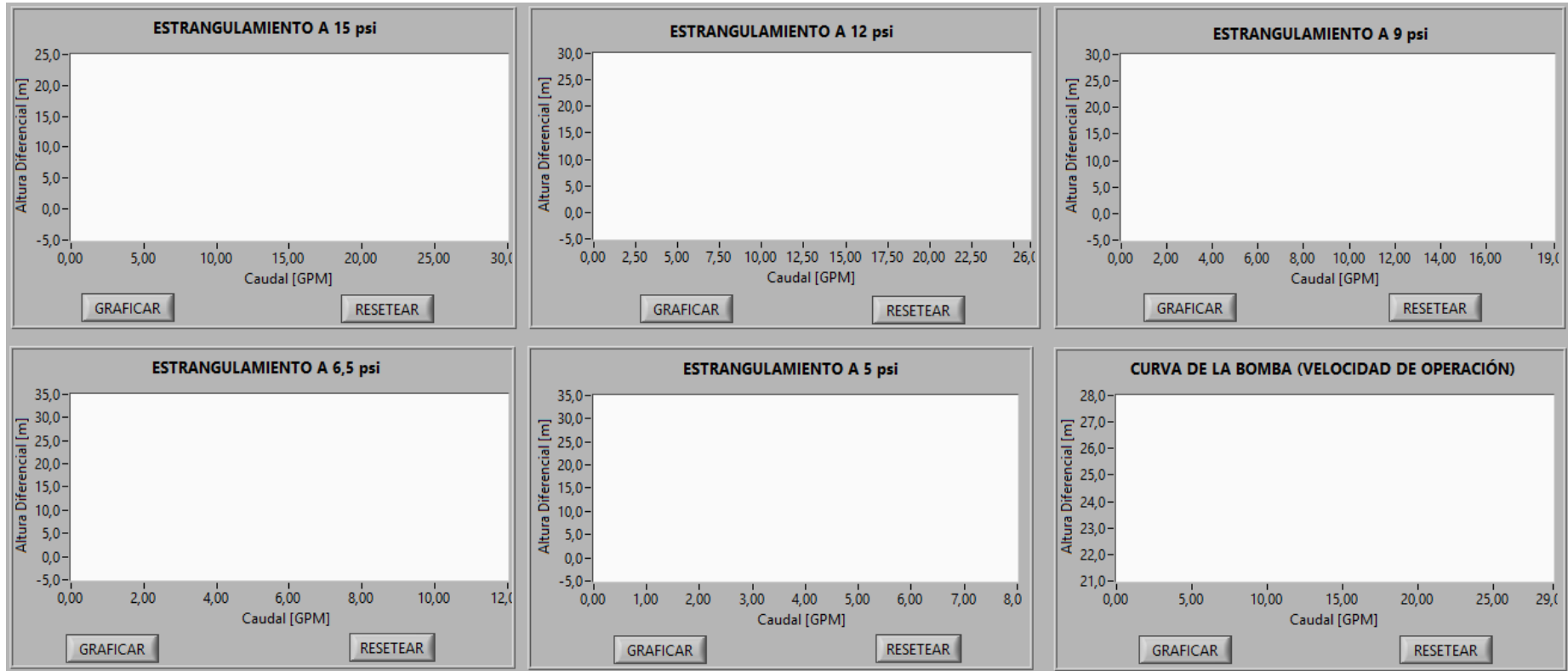
# Desarrollo del proyecto

## Programación LabView – Pantalla análisis de curvas características control por variador de frecuencia



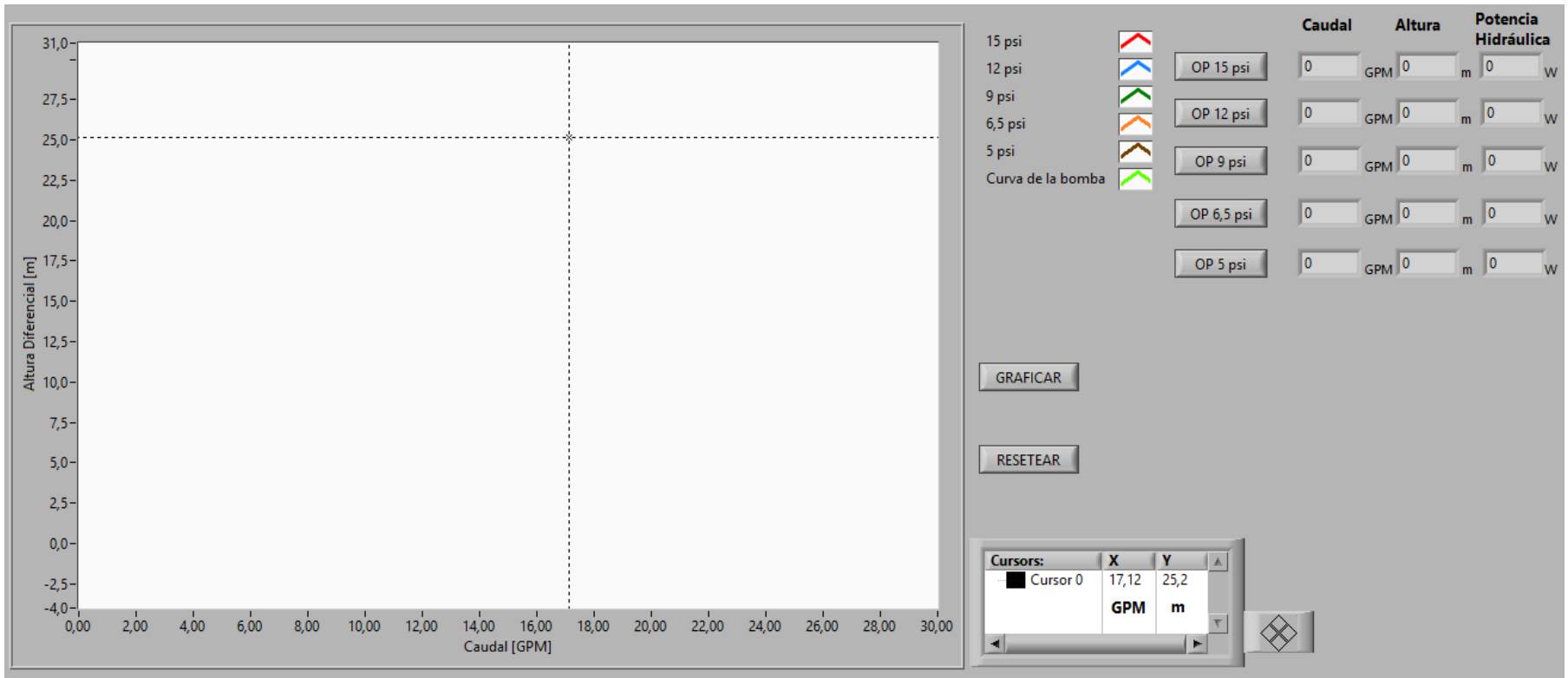
# Desarrollo del proyecto

## Programación LabView – Pantalla curvas características control por estrangulamiento



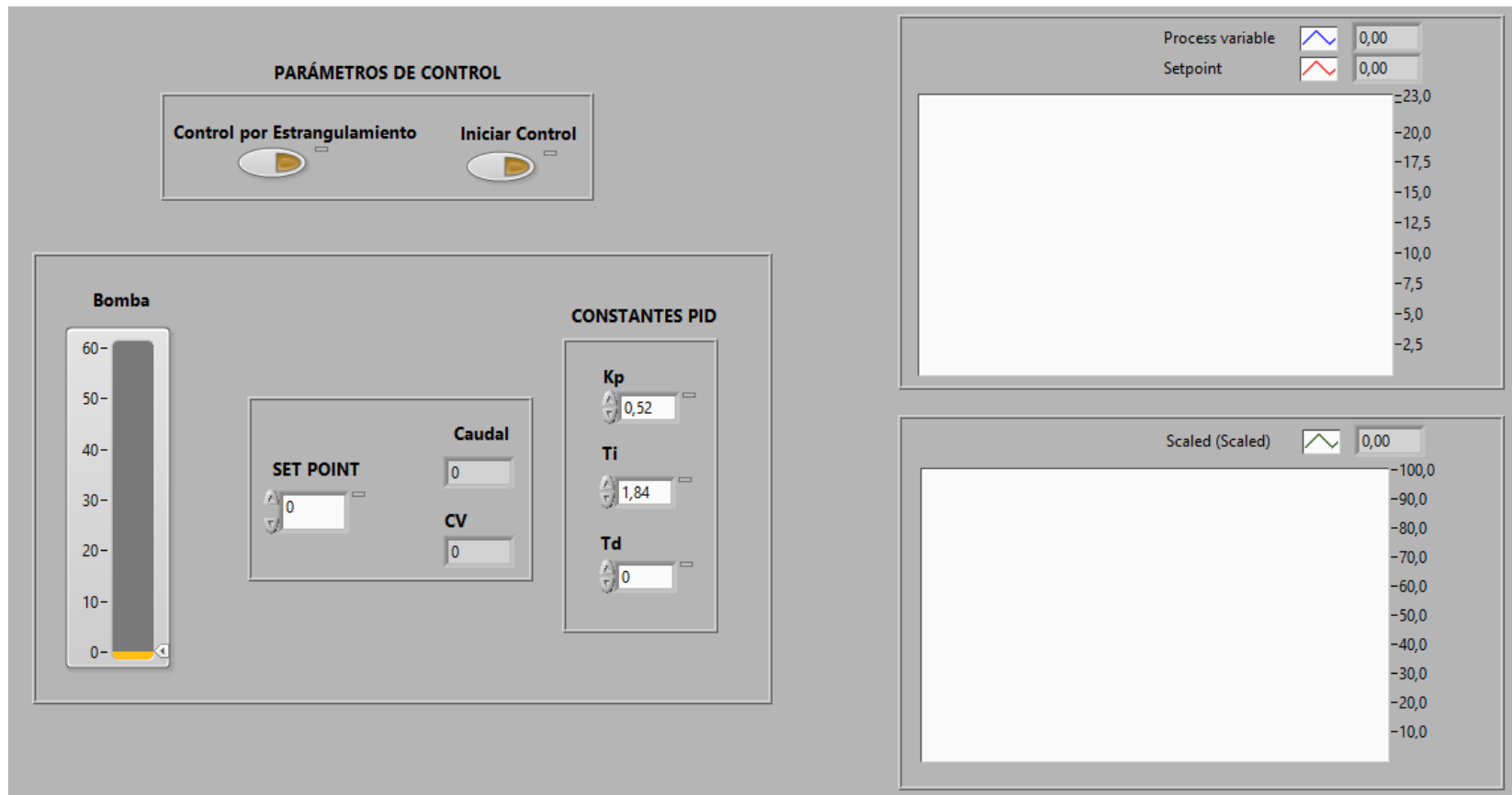
# Desarrollo del proyecto

## Programación LabView – Pantalla análisis de curvas características control por estrangulamiento



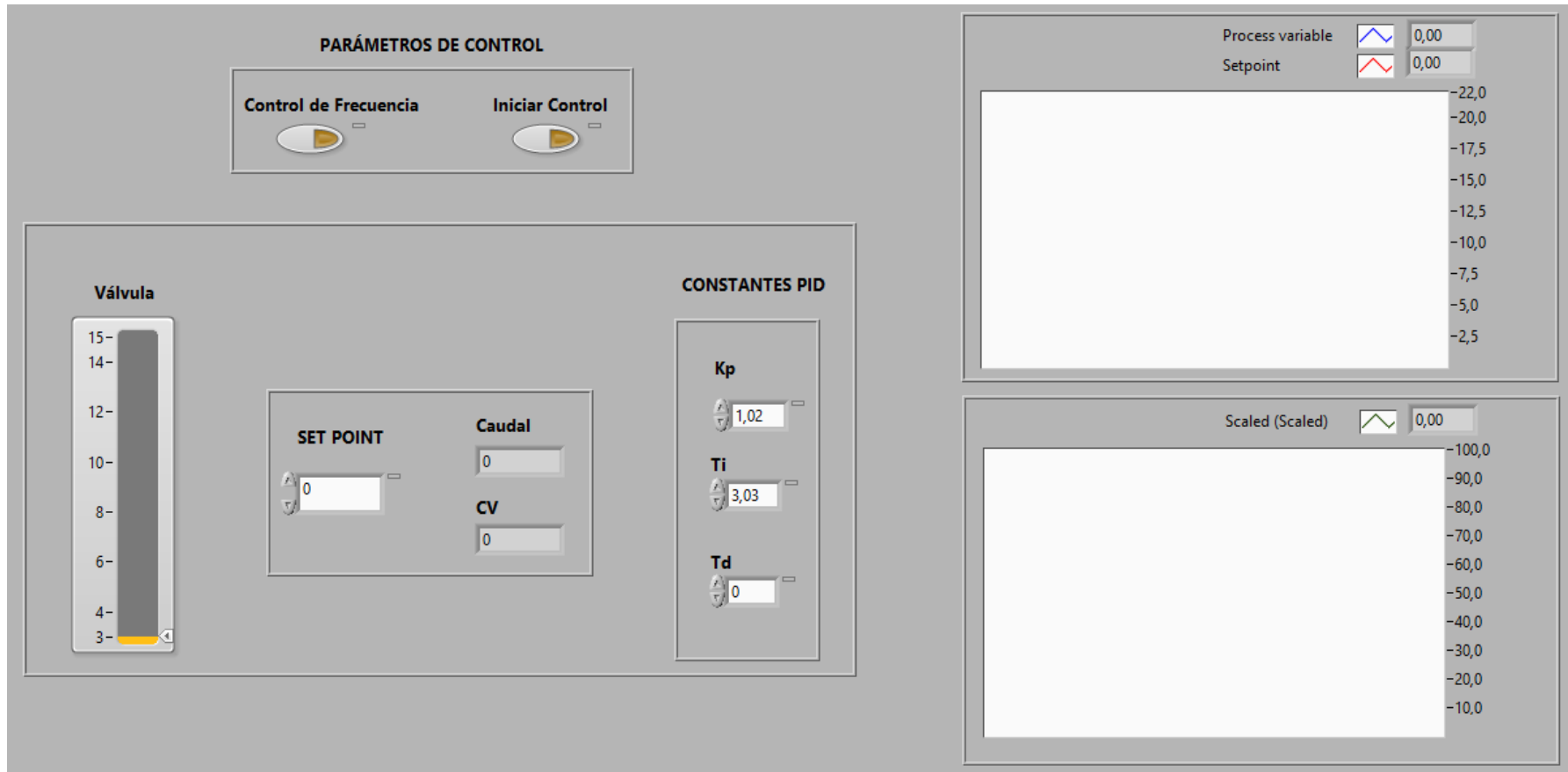
# Desarrollo del proyecto

## Programación LabView – Pantalla control por válvula de control



# Desarrollo del proyecto

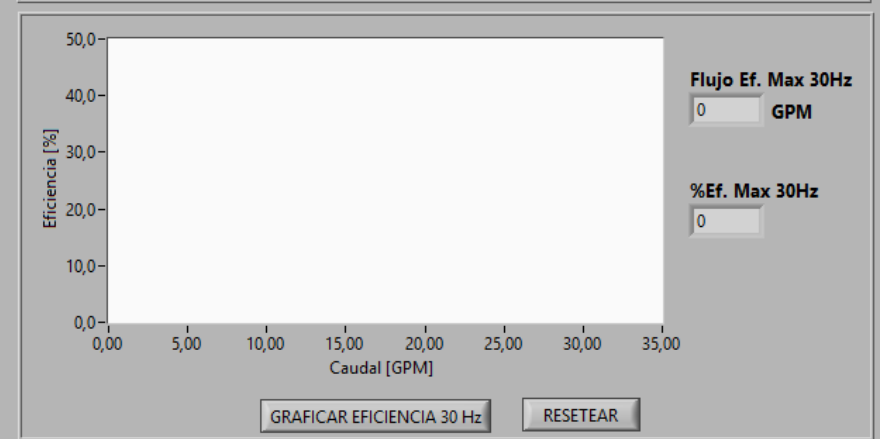
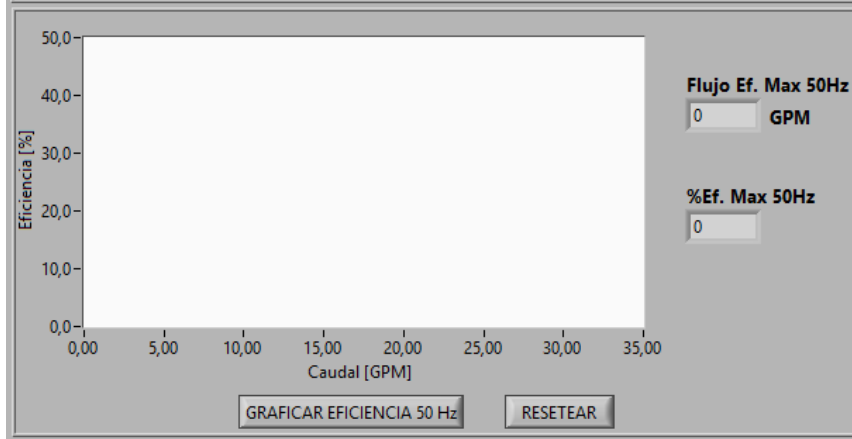
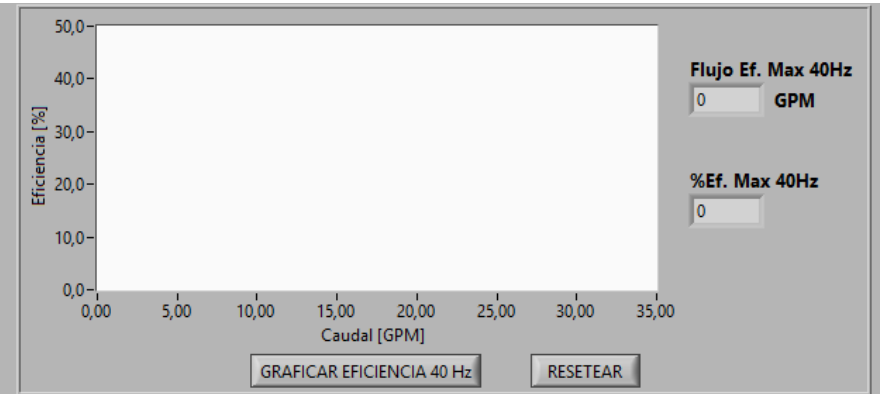
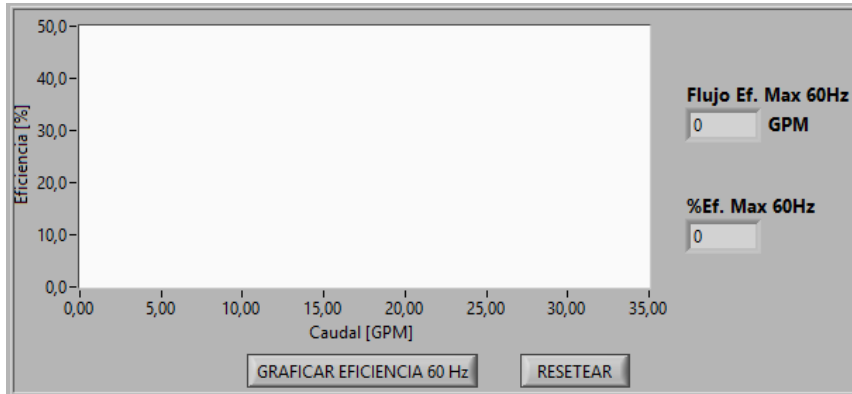
## Programación LabView – Pantalla control por variador de frecuencia





# Desarrollo del proyecto

## Programación LabView – Pantalla curvas características de eficiencia de la bomba centrífuga



# Desarrollo del proyecto

## Programación LabView – Pantalla comparación métodos implementados



# Resultados

## Datos Control por variador de Frecuencia

HMI.vi Front Panel

File Edit View Project Operate Tools Window Help

Presentación Diagrama de Bloques-P&ID Datos CF Datos CE Curvas CF Analisis Curvas CF Curvas CE Analisis Curvas CE Control por Válvula de Control Control por Variador de Frecuencia Eficiencia Eficiencia 2 Compa

Search

### FRECUECIA A 60 HZ

0,00298386	27,114
1,00854	26,295
2,00714	26,1888
3,00574	26,0486
4,00335	25,9186
5,00095	25,6379
6,00552	25,4109
7,00113	25,3079
8,00968	25,315
9,00728	25,3292
10,0059	25,2839
11,0015	25,4072
12,008	25,4077
13,0017	25,3231
14,0003	25,1909
15,0038	25,1613
16,0054	24,2747
17,005	24,1182
18,0016	23,8573
19,0022	23,7205
20,0038	23,5269
21,0014	22,9582
22,002	22,7359

### FRECUECIA A 50 HZ

0,00198924	17,6923
1,00854	16,8659
2,00615	16,7737
3,00873	16,7536
4,00136	16,8785
5,0099	16,8867
6,00054	16,902
7,00809	16,8774
8,00172	16,7981
9,00927	16,7539
10,0059	16,7472
11,0045	16,6509
12,0031	16,5585
13,0066	16,4831
14,0082	16,0727
15,0058	15,7911
16,0014	15,4627
17	15,4122
18,0096	15,0609
19,0022	14,8797

### FRECUECIA A 40 HZ

0,00298386	9,34409
1,00854	9,24303
2,00714	9,16416
3,00176	9,23864
4,00335	9,24396
5,00791	9,20524
6,00154	9,2228
7,0071	9,21067
8,00172	9,15806
9,00231	9,11953
10,0059	9,0126
11,0045	8,96497
12,008	8,85016
13,0007	8,55656
14,0062	8,19111
15,0038	8,0628
16,0024	8,00304

### FRECUECIA A 30 HZ

0,00298386	3,33206
1,00854	3,23133
2,00217	3,19425
3,00176	3,26175
4,00633	3,25626
5,00493	3,30331
6,00353	3,19092
7,00411	3,18931
8,00669	3,14438
9,00131	3,11865
10,0049	3,01356
11,0035	2,94543
12,0041	2,87009
13,0086	2,76543
14,0082	2,63085

### FRECUECIA A 20 HZ

0,00298386	-1,05197
1,00357	-1,08795
2,00118	-1,04806
3,00475	-1,01414
4,00136	-1,05468
5,00493	-1,07089
6,00949	-1,13329
7,00113	-1,16001
8,00271	-1,21997
9,00131	-1,28183

### OBTENCIÓN DE DATOS

**FRECUECIA A 60 HZ**  
DATOS RESETEAR

**FRECUECIA A 50 HZ**  
DATOS RESETEAR

**FRECUECIA A 40 HZ**  
DATOS RESETEAR

**FRECUECIA A 30 HZ**  
DATOS RESETEAR

**FRECUECIA A 20 HZ**  
DATOS RESETEAR

RECUPERAR  
GUARDAR

Frecuencia Bomba Set Caudal  
0 Hz 0

OFF Iniciar Datos Automático

### CONTROL

Iniciar Control

Caudal Altura Diferencial  
0 0

# Resultados

## Datos Control por Estrangulamiento

HMI.vi Front Panel

File Edit View Project Operate Tools Window Help

15pt Application Font

Presentación Diagrama de Bloques-P&ID Datos CF Datos CE Curvas CF Analisis Curvas CF Curvas CE Analisis Curvas CE Control por Válvula de Control Control por Variador de Frecuencia Eficiencia Eficiencia 2 Compa

### ESTRANGULAMIENTO A 15 psi

0,00198924	-3,71941
1,00357	-3,78534
2,01013	-3,73028
3,00276	-3,73519
3,99937	-3,58343
5,00891	-3,29726
6,00054	-2,94945
7,00212	-2,58216
8,00868	-2,2414
8,99932	-1,74403
10,0198	-1,01516
11,0005	-0,453715
12,012	0,278701
13,0086	1,11477
14,0052	2,70638
15,0038	6,15919

### ESTRANGULAMIENTO A 12 psi

0,00298386	-3,76219
1,01551	-3,74606
2,00018	-3,68086
3,00375	-3,56286
4,00335	-3,25696
4,99995	-2,78481
6,00054	-2,43355
7,01207	-1,81043
7,99973	-1,1758
9,00927	-0,228338
10,0109	0,751053
11,0104	2,08893
12,017	2,92422
13,0017	7,4864
14,0023	11,2678

### ESTRANGULAMIENTO A 9 psi

0,00298386	-3,75763
1,00755	-3,76534
2,00018	-3,67826
3,00077	-3,11619
4,00335	-2,37661
4,99995	-1,45508
6,00154	-0,185984
7,00113	1,18425
8,00968	2,81324
9,0033	5,21805
10,0039	6,51543
11,0065	8,58912
12,019	15,4056
13,0086	17,7916

### ESTRANGULAMIENTO A 6,5 psi

0,00298386	-3,7303
1,00954	-2,68556
2,00316	-2,38078
2,99977	-1,06918
4,00036	0,735378
5,00493	3,33626
6,00054	6,24057
7,00411	9,58484
8,0057	13,956
9,00628	17,8206

### ESTRANGULAMIENTO A 5 psi

0,00198924	-3,75798
1,00854	-2,23241
2,00018	-0,181513
3,00176	3,02365
4,00335	7,5095
5,00095	13,1672
6,00054	20,4484

### OBTENCIÓN DE DATOS

ESTRANGULAMIENTO A 15 psi

DATOS RESETEAR

ESTRANGULAMIENTO A 12 psi

DATOS RESETEAR

ESTRANGULAMIENTO A 9 psi

DATOS RESETEAR

ESTRANGULAMIENTO A 6,5 psi

DATOS RESETEAR

ESTRANGULAMIENTO A 5 psi

DATOS RESETEAR

RECUPERAR

GUARDAR

Estrangulamiento Válvula Set Caudal

3 psi 0

OFF Iniciar Datos Automático

### CONTROL

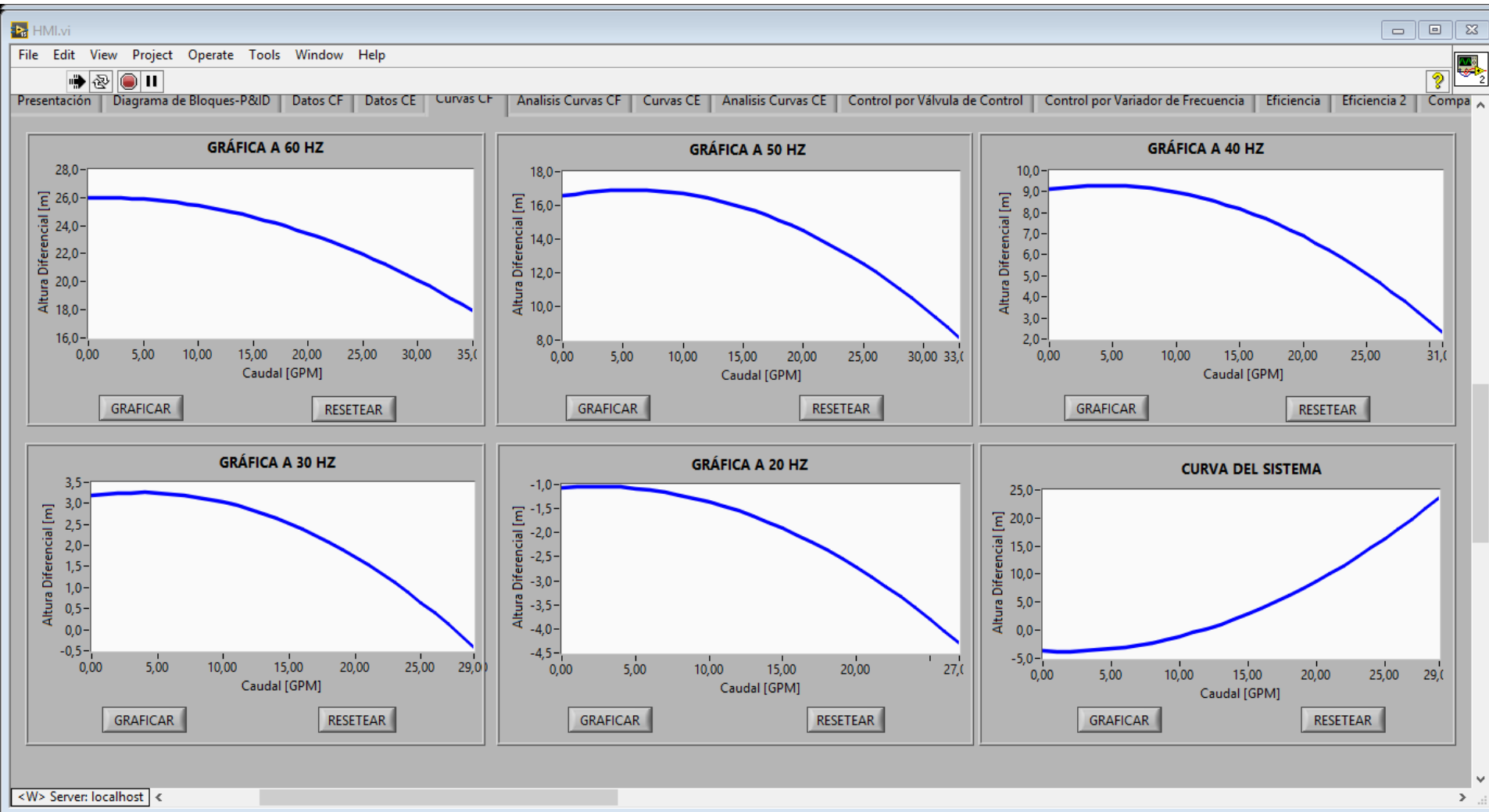
Iniciar Control

Caudal 0

Altura diferencial 0

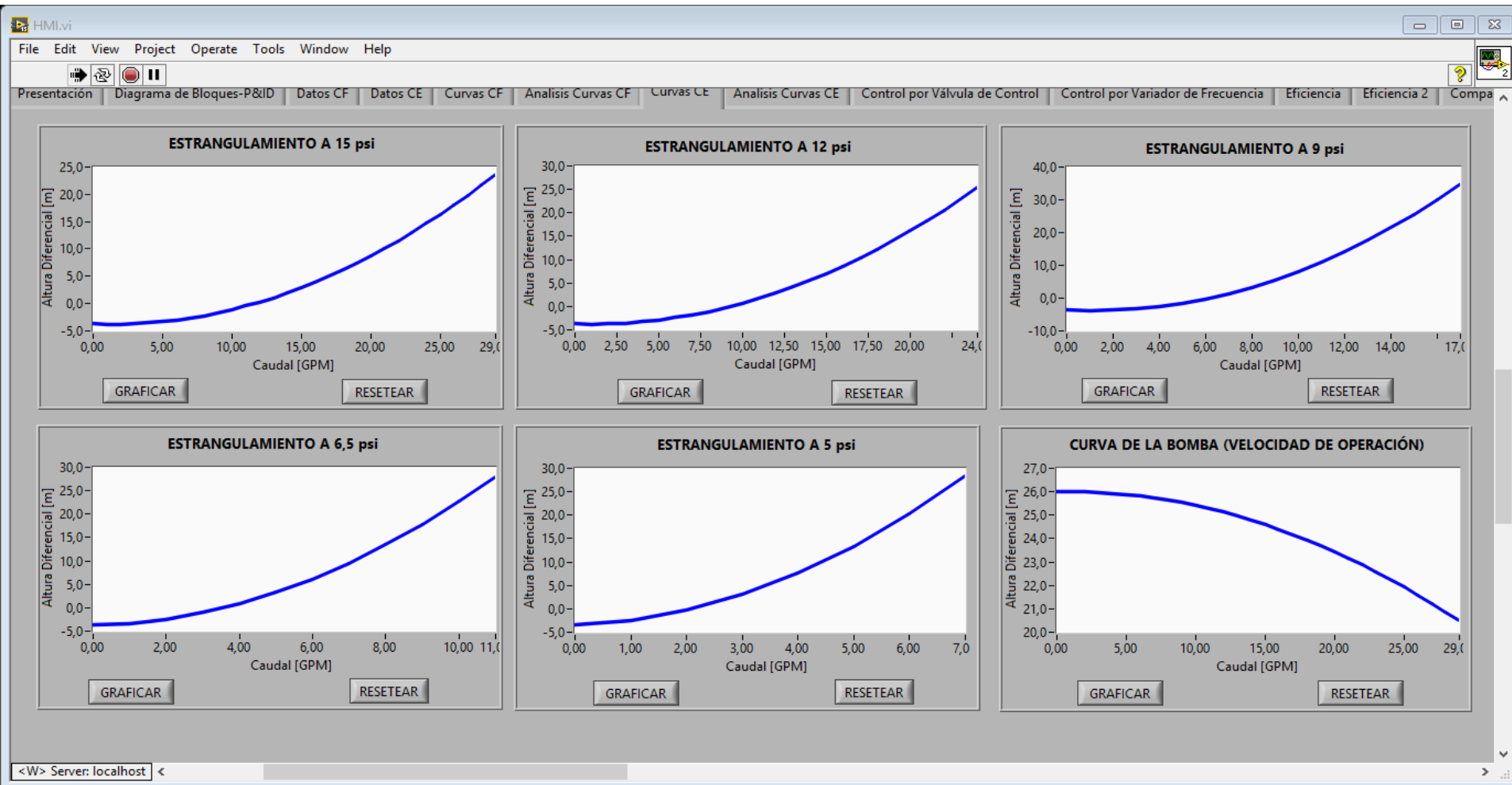
# Resultados

## Curvas Control por Variador de Frecuencia



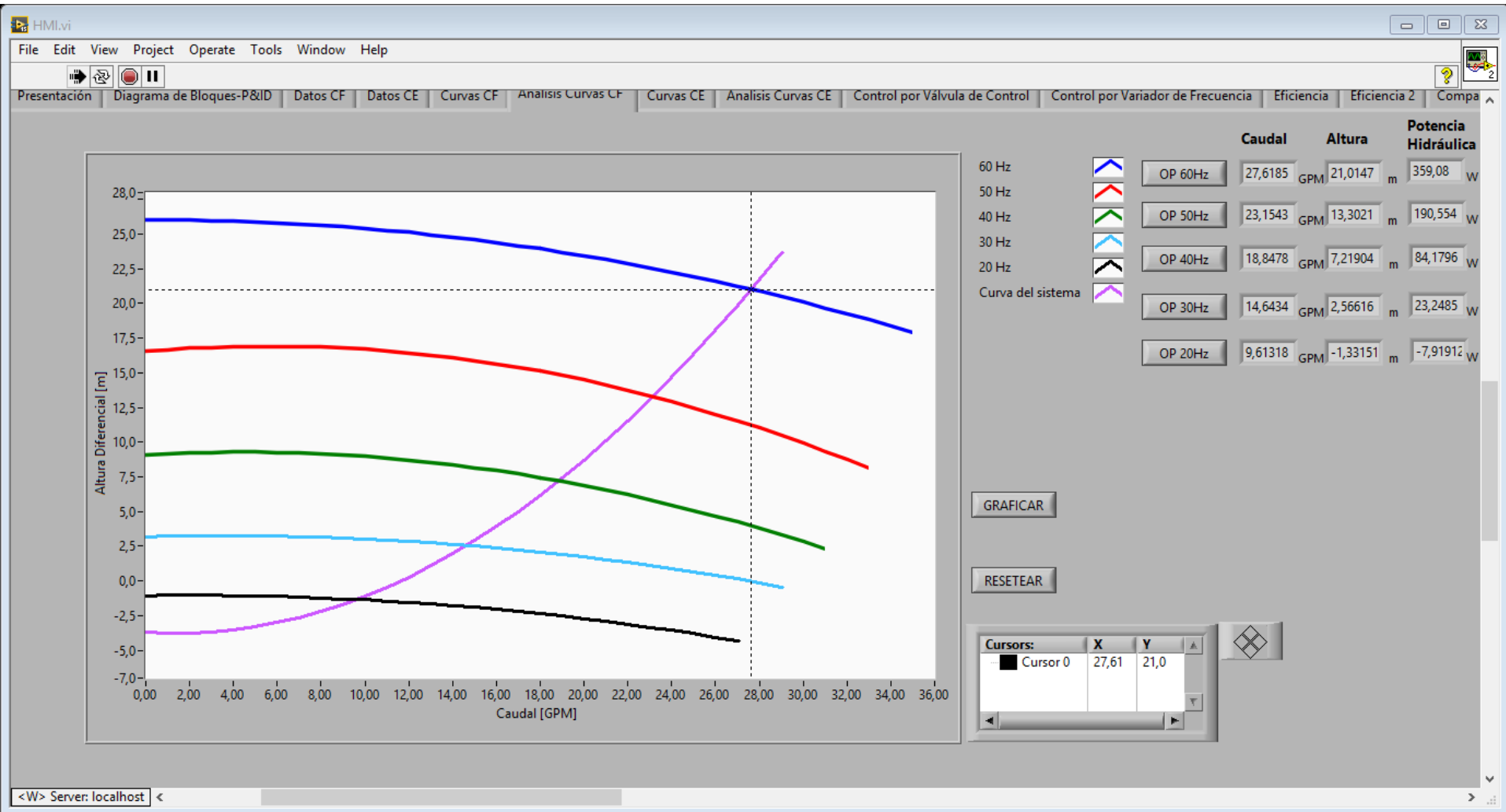
# Resultados

## Curvas Control por Estrangulamiento



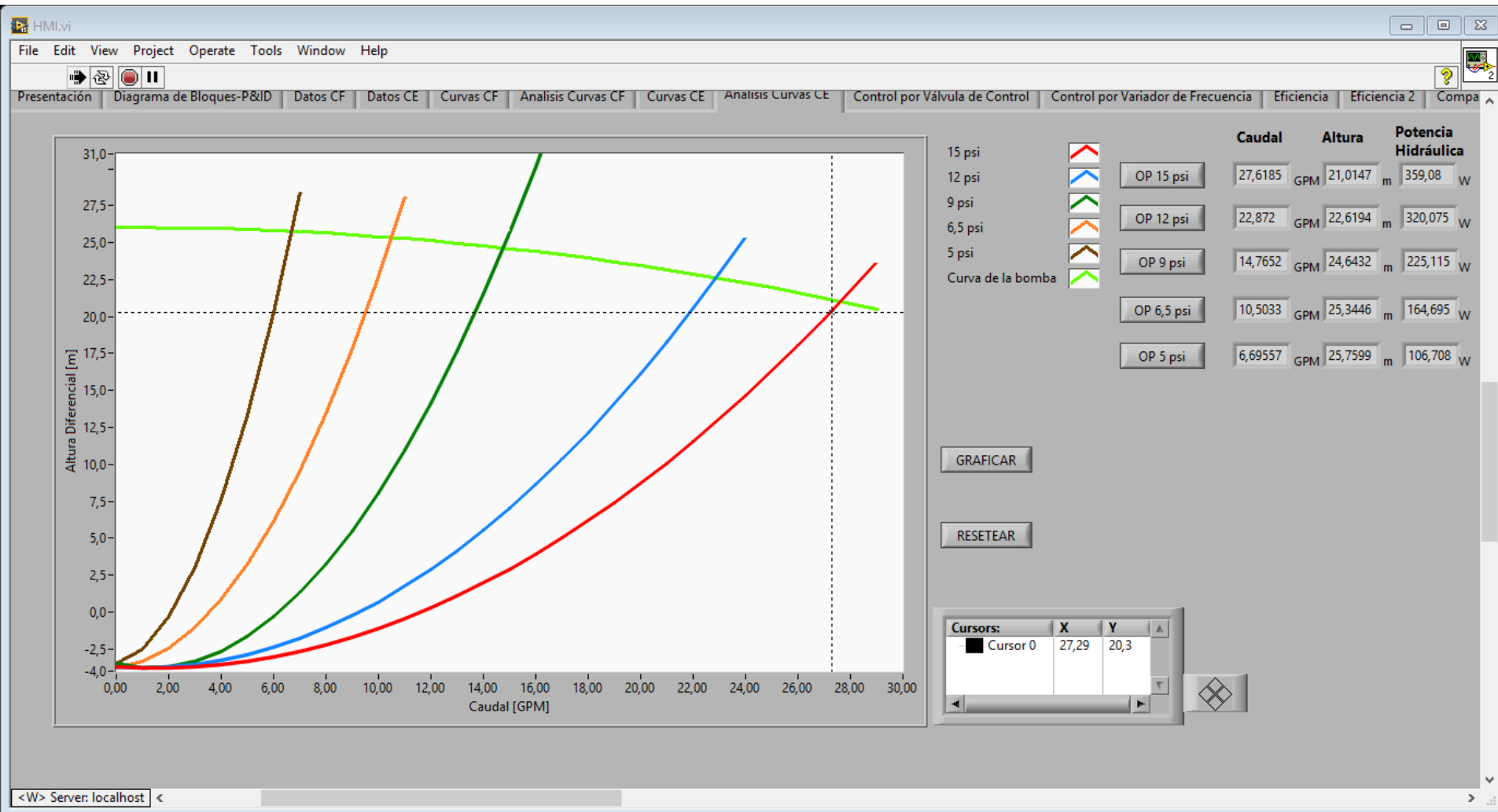
# Resultados

## Análisis de Curvas Control por Variador de Frecuencia



# Resultados

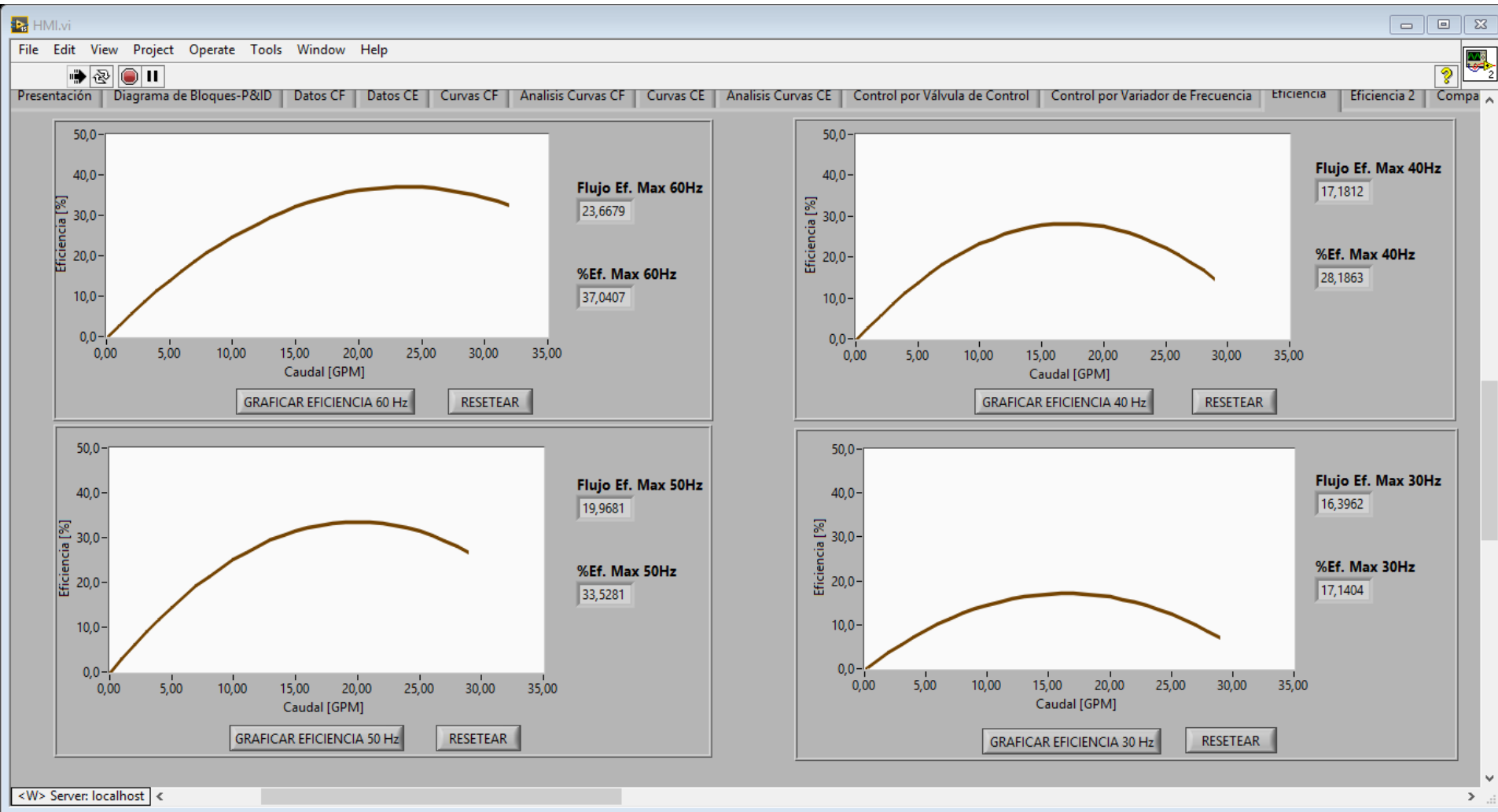
## Análisis de Curvas Control por Estrangulamiento





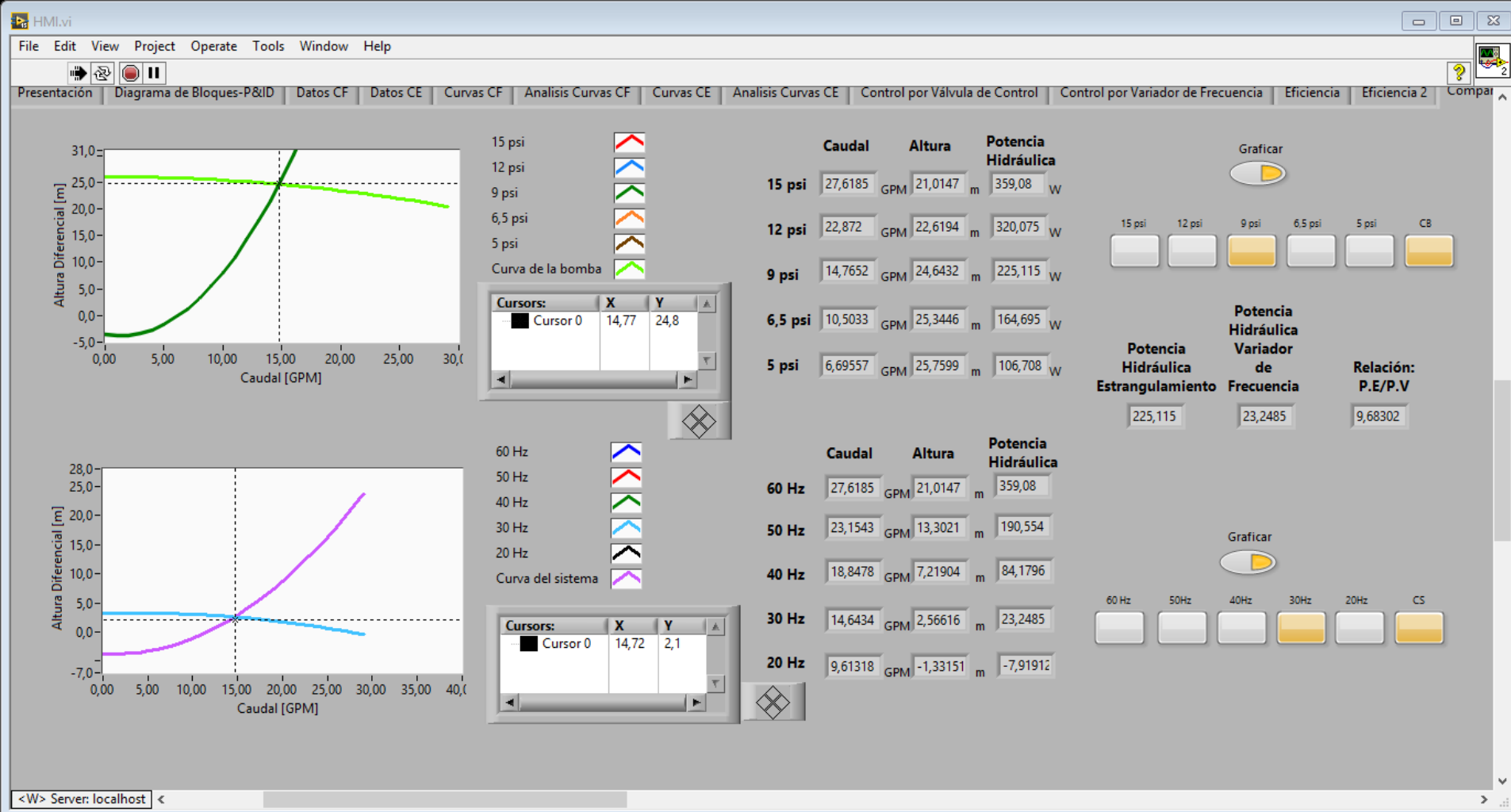
# Resultados

## Análisis de Curvas de Eficiencia



# Resultados

## Análisis Comparativo



# ALCANCES

- La programación del PLC, puede ser editada fácilmente por medio del uso del software TIA portal, con lo que el programa es susceptible para cambios y mejoras.
- Al poseer dos elementos de control final como son la válvula y el variador de frecuencia, se puede realizar el control por ambos métodos, lo cual permite obtener de manera experimental las curvas características requeridas.
- La curva de la bomba se obtiene con la implementación del control PI, con el que se controla el caudal mediante estrangulamiento a una velocidad de bomba constante; la implementación de dicho control permite obtener datos de caudal exactos.
- La curva del sistema se obtiene mediante el uso del control PI, cuyo elemento de control final es el variador de frecuencia, a una posición de válvula de control constante con la ayuda del control PI, se obtienen datos exactos de caudal.

# ALCANCES

- La obtención de datos se puede realizar tanto de forma manual como de forma automática; la toma automática de datos, hace que el sistema sea semi-automático, ya que con el refuerzo del control PI, agrega precisión y exactitud en la adquisición de datos para la construcción de las curvas características.
- Las Variables de proceso, así como el control, puede ser monitoreado tanto en el PC como en el Touch panel, donde se puede observar las gráficas de cada control implementado, realizar cambios de set point y modificar las constantes del control como son  $K_p$ ,  $T_i$ , y  $T_d$ .
- El sistema permite obtener las curvas de eficiencia a distintos valores de frecuencia constante, de las cuales se obtiene el porcentaje de eficiencia máxima, así como el punto de caudal en el que obtiene la máxima eficiencia.
- Se puede comparar la potencia hidráulica de los puntos de operación obtenida por el método de estrangulamiento con la potencia hidráulica de los puntos de operación obtenida por el método de variador de frecuencia, donde se pueden observar las curvas características, puntos de operación, así como la relación existente entre ambos métodos para su análisis.

# LIMITACIONES

- El banco de pruebas de bomba centrífuga no puede ser operado con una alimentación de 110 Voltios de corriente alterna, ya que la bomba centrífuga que se utiliza es trifásica y requiere que la alimentación de red sea de 220 voltios de corriente alterna para su correcto funcionamiento.
- El servidor OPC, al ser versión demo, solamente posee un tiempo de uso de dos horas, con lo que, si se desea continuar trabajando, se debe reiniciar el computador, o a su vez finalizar las tareas del OPC en el administrador de dispositivos para resetear el contador de dos horas que posee el OPC.
- El autómata programable instalado en el sistema de entrenamiento de bombas centrífugas permite implementar solamente el control PID, lo cual limita a la implementación de controles avanzados como control difuso o control predictivo.

# CONCLUSIONES

- El banco de pruebas de bomba centrífuga cumple con el funcionamiento óptimo para que el estudiante pueda reforzar los conocimientos adquiridos en forma teórica, lo pueda hacer de manera experimental mediante la manipulación de instrumentos a nivel industrial.
- El banco de pruebas de bomba centrífuga presenta un control semi-automático, lo cual permite la toma de datos de una forma más fácil sin que el usuario tenga que realizar un estrangulamiento manual de válvula para los cambios de caudal en el proceso.
- Los transmisores industriales de presión y flujo entregan señales estándar de 4 a 20 mA, lo que ayuda a la toma y monitoreo de datos en tiempo real, con lo que se consigue exactitud en las mediciones.
- El sistema permite controlar el caudal del proceso mediante la implementación de elementos de control final distintos como son: variador de frecuencia y válvula de control proporcional, los cuales son de ayuda para adquirir de forma automática los datos, para la construcción de las curvas características de los métodos implementados.

# CONCLUSIONES

- El punto de operación está determinado por la intersección entre la curva de la bomba y la curva del sistema, el mismo que varía al modificar la velocidad de operación de la bomba centrífuga así como la apertura de la válvula de control, lo que permite visualizar el funcionamiento de los métodos de control de caudal implementados.
- A velocidades de operación bajas de la bomba centrífuga, el caudal se vuelve menos turbulento, lo que permite al transmisor de flujo entregar datos con menor variación.
- Al momento de disminuir la velocidad de operación de la bomba centrífuga, se puede observar que disminuye el caudal tanto como la altura diferencial, lo que ocasiona que la bomba centrífuga consuma solo la energía necesaria para impulsar el caudal en el proceso.
- Al utilizar el método de control de caudal por estrangulamiento se demostró que al cerrarse la válvula de control en forma proporcional a la señal de control enviada desde el PLC, disminuye el caudal pero aumenta la altura diferencial, lo que ocasiona que la bomba centrífuga consuma energía como si estuviese trabajando siempre al máximo de caudal.

# CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos, la potencia consumida por parte del método de control de caudal por variador de frecuencia tiende a ser menor que el método de control de caudal por estrangulamiento, debido a que la bomba centrífuga consume solo la energía necesaria, de acuerdo a la frecuencia establecida por el variador, para impulsar el caudal en el proceso.
- La eficiencia de la bomba centrífuga indica la relación entre la potencia hidráulica y la potencia eléctrica, en la cual la potencia hidráulica depende la altura diferencial y del flujo, mientras que la potencia eléctrica es la potencia suministrada por la red de alimentación.
- Las curvas características de eficiencia de la bomba centrífuga, permiten determinar el valor de caudal máximo en que la bomba alcanza el mayor porcentaje de eficiencia a sus diferentes velocidades de operación.



# RECOMENDACIONES

- Los escalamientos se deben realizar dentro de la programación del PLC, para que las variables puedan ser manipuladas y monitoreadas de forma normalizada.
- El uso de calibradores de presión es recomendable, para establecer de manera correcta la acción del conversor de corriente a presión y se encuentre en el rango estándar para enviar las señales de control hacia la válvula proporcional.
- Se debe verificar la existencia de la señal de alimentación tanto para la válvula de control como para el conversor de corriente a presión, para su correcta operación.

# RECOMENDACIONES

- La bomba centrífuga no debe ser operada a válvula de control completamente cerrada por un largo periodo de tiempo, debido a que puede ocasionar daños internos en el mismo.
- Utilizar la guía del banco de pruebas de bomba centrífuga, previa instrucción en elementos de control de final y métodos de control de caudal, para realizar prácticas de laboratorio de manera eficiente y evitar posibles fallos.
- Verificar que las conexiones del panel lateral del banco de pruebas de bomba centrífuga se encuentren establecidas correctamente, para el óptimo funcionamiento de los instrumentos del proceso.

# GRACIAS