



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

**TEMA: REPOTENCIACIÓN DEL SISTEMA DE
ENTRENAMIENTO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS PARA LA
OBTENCIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL
CONTROL DE CAUDAL MEDIANTE ESTRANGULAMIENTO**

AUTORES:

Pablo José Salazar Villacís

Marcelo Javier Silva Salinas

DIRECTOR: Ing. Edwin Pruna

LATACUNGA

2017



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el proyecto de investigación, “**REPOTENCIACIÓN DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DE CAUDAL MEDIANTE ESTRANGULAMIENTO**” realizado por **PABLO JOSÉ SALAZAR VILLACÍS** y **MARCELO JAVIER SILVA SALINAS**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a **PABLO JOSÉ SALAZAR VILLACÍS** y **MARCELO JAVIER SILVA SALINAS** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 18 de mayo de 2017

Ing. Edwin Pruna
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **PABLO JOSÉ SALAZAR VILLACÍS** y **MARCELO JAVIER SILVA SALINAS**, con cedula de identidad N° 1803576592 y N° 1804207262, respectivamente, declaramos que el presente proyecto de investigación, **“REPOTENCIACIÓN DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DE CAUDAL MEDIANTE ESTRANGULAMIENTO”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 18 de mayo de 2017


Pablo José Salazar Villacís
C.I.: 1803576592


Marcelo Javier Silva Salinas
C.I.: 1804207262



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA DE ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **PABLO JOSÉ SALAZAR VILLACÍS** y **MARCELO JAVIER SILVA SALINAS**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**REPOTENCIACIÓN DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DE CAUDAL MEDIANTE ESTRANGULAMIENTO**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 18 de mayo de 2017

Pablo Salazar

Pablo José Salazar Villacís
C.I.: 1803576592

Marcelo Silva

Marcelo Javier Silva Salinas
C.I.: 1804207262

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Marcelo y Teresa quienes han sido un apoyo incondicional en ayuda de poder alcanzar mis objetivos. A mi hermana Verónica por sus consejos y compartir momentos buenos y malos, al angelito que tengo en el cielo Papa Micho que me cuida y me brinda muchas bendiciones; siendo todos ustedes un pilar fundamental en mi formación personal como profesional y en apoyo para concluir esta etapa importante de mi vida.

Marcelo

Dedico este trabajo a Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor. A mis padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. A mi esposa, por acompañarme en el culmen de mi carrera, brindarme su apoyo y compañía. A mi hermano y hermanas, por haber compartido gratas experiencias.

Pablo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme salud, vida y poder vivir momentos gratos cada día, a mis padres, mi hermana, todos mis familiares que siempre me han sabido brindar su apoyo y palabras de aliento y motivación para formarme como una persona útil en la vida. A todos los docentes que impartieron su conocimiento durante mi formación profesional y un agradecimiento especial al Ing. Edwin Pruna por haberme tomado en cuenta para el desarrollo de este trabajo, por brindarme sus conocimientos y por haberme compartido su amistad.

Marcelo

Agradezco a Dios por todas las gracias impartidas en este tiempo. Agradezco a mi padre, por su esfuerzo y sacrificio. A mi madre, por su apoyo y cuidados. A mi esposa, por su paciencia y cariño brindado, a todas las personas que de una u otra manera han sido de ayuda en el transcurso de la carrera.

Pablo

ÍNDICE

PORTADA.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv

CAPÍTULO I

1. PROBLEMÁTICA.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Justificación e Importancia.....	4
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4

CAPÍTULO II

2. MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO.....	6
2.1. Marco Contextual.....	6
2.2. Objeto de investigación.....	6
2.2.1. Descripción del objeto de investigación.....	6
2.3. Marco teórico.....	8
2.3.1. Fundamentación Teórica.....	8
2.3.2. Transmisores Industriales.....	8
2.3.3. Transmisores electrónicos.....	8
2.3.4. Transmisor de presión georg fischer signet 8450.....	9
2.3.5. Sensor de presión georg fischer signet 2450.....	10
2.3.6. Transmisor de flujo georg fischer signet 8550.....	11
2.3.7. Sensor de flujo rueda de paletas georg fischer signet 8510.....	11
2.3.8. Controlador lógico programable.....	12
2.3.9. PLC S7 – 1200.....	13

2.3.10. Interfaces de entrada/salida	14
2.3.11. Módulo de E/S analógicas Sm1234	14
2.3.12. Elementos de control final.....	15
2.3.13. Variador de frecuencia Sinamics G110.....	15
2.3.14. Conversor Corriente a Presión	17
2.3.15. Conversor Corriente a Presión Fisher 846	18
2.3.16. Válvula bridada Badger Meter RCV	19
2.3.17. Bomba centrífuga	20
2.3.18. Touch Panel Simatic KTP 600	21
2.3.19. Registrador trifásico FLUKE 1735	22
2.3.20. Métodos de control de caudal para bombas centrífugas.....	23
2.3.21. Control de caudal por marcha-parada (ON-OFF)	24
2.3.22. Control por estrangulamiento de la impulsión	24
2.3.23. Control por derivación de caudal	25
2.3.24. Control con velocidad variable.....	26
2.3.25. Eficiencia en bombas centrífugas.....	26

CAPÍTULO III

3. DESARROLLO DEL SISTEMA.....	28
3.1. Requisitos del sistema	28
3.2. Estructura del sistema.....	29
3.3. Diagramas de Panel.....	29
3.3.1. Diagrama del Panel Frontal.....	29
3.3.2. Diagrama del Panel Lateral	30
3.4. Diagrama de Bloques del sistema	31
3.5. Diagrama P&ID del sistema.....	33
3.6. Diagrama de flujo del sistema.....	36
3.7. Programación de los equipos e instrumentos que conforman el sistema	38
3.7.1. Programación del variador de frecuencia.....	38
3.7.2. Ajuste de Convertidor Corriente a Presión.....	40
3.7.3. Ajuste del transmisor de flujo	41
3.7.4. Ajuste de los transmisores de presión	44
3.7.5. Configuración y programación del PLC y TOUCH PANEL.....	47
3.7.6. Configuración del OPC	56
3.7.7. Programación del software LabView	60
3.8. Conexiones del registrador trifásico FLUKE 1735	79

CAPÍTULO IV

4.	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
4.1.	Consideraciones Generales.....	81
4.2.	Modo de utilización.....	82
4.3.	Control de caudal por el método de variador de frecuencia.....	82
4.3.1.	Curva característica de la bomba a 60 Hz	82
4.3.2.	Curva característica de la bomba a 50 Hz	85
4.3.3.	Curva característica de la bomba a 40 Hz	88
4.3.4.	Curva característica de la bomba a 30 Hz	90
4.3.5.	Curva característica de la bomba a 20 Hz	92
4.3.6.	Curva característica del sistema	95
4.3.7.	Puntos de operación entre curva de la bomba y curva del sistema	97
4.4.	Método del control de caudal por estrangulamiento	99
4.4.1.	Curva característica de la bomba (velocidad de operación constante).....	99
4.4.2.	Curva característica por estrangulamiento a 15 psi	102
4.4.3.	Curva característica por estrangulamiento a 12 psi.....	104
4.4.4.	Curva característica por estrangulamiento a 9 psi.....	107
4.4.5.	Curva característica por estrangulamiento a 6.5 psi.....	109
4.4.6.	Curva característica por estrangulamiento a 5 psi.....	110
4.4.7.	Puntos de operación curva de la bomba y curvas por estrangulamiento.....	112
4.5.	Comparación de la potencia consumida entre los métodos implementados.	114
4.6.	Curvas de eficiencia de la bomba centrífuga	117
4.6.1.	Curva de Eficiencia a 60 Hz.....	117
4.6.2.	Curva de Eficiencia a 50 Hz.....	120
4.6.3.	Curva de Eficiencia a 40 Hz.....	123
4.6.4.	Curva de Eficiencia a 30 Hz.....	127
4.7.	Alcances y Limitaciones	131
4.7.1.	Alcances	131
4.7.2.	Limitaciones	132

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	133
5.1.	Conclusiones	133
5.2.	Recomendaciones.....	135

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
---	------------

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Parámetros ingresados al variador de frecuencia.....	38
Tabla 2	Datos almacenados en vectores.....	66
Tabla 3	Vectores obtenidos curva característica de la bomba a 60 Hz.....	83
Tabla 4	Vectores generados del Sub VI construcción curva de la bomba.....	84
Tabla 5	Vectores obtenidos curva característica de la bomba a 50 Hz.....	85
Tabla 6	Vectores generados del Sub VI construcción curva de la bomba.....	86
Tabla 7	Vectores obtenidos curva característica de la bomba a 40 Hz.....	88
Tabla 8	Vectores generados del Sub VI construcción curva de la bomba.....	89
Tabla 9	Vectores obtenidos curva característica de la bomba a 30 Hz.....	90
Tabla 10	Vectores generados del Sub VI construcción curva de la bomba.....	91
Tabla 11	Vectores obtenidos curva característica de la bomba a 20 Hz.....	93
Tabla 12	Vectores generados del Sub VI construcción curva de la bomba.....	93
Tabla 13	Vectores obtenidos curva característica del sistema.....	95
Tabla 14	Vectores generados del Sub VI construcción curva del sistema.....	96
Tabla 15	Vectores obtenidos curva característica de la bomba.....	99
Tabla 16	Vectores del Sub VI construcción curva de la bomba.....	100
Tabla 17	Vectores curva característica por estrangulamiento a 15 psi.....	102
Tabla 18	Vectores del Sub VI construcción curva por estrangulamiento.....	103
Tabla 19	Vectores curva característica por estrangulamiento a 12 psi.....	105
Tabla 20	Vectores del Sub VI construcción curva por estrangulamiento.....	105
Tabla 21	Vectores curva característica por estrangulamiento a 9 psi.....	107
Tabla 22	Vectores del Sub VI construcción curva por estrangulamiento.....	108
Tabla 23	Vectores curva característica por estrangulamiento a 6.5 psi.....	109
Tabla 24	Vectores del Sub VI construcción curva por estrangulamiento.....	110
Tabla 25	Vectores curva característica por estrangulamiento a 5 psi.....	111
Tabla 26	Vectores del Sub VI construcción curva por estrangulamiento.....	111
Tabla 27	Potencia de entrada a la bomba en 60 Hz.....	117
Tabla 28	Vector obtenido de eficiencia a 60 Hz.....	118
Tabla 29	Vector de eficiencia a 60 Hz generado por el ajuste de curvas.....	119
Tabla 30	Potencia de entrada a la bomba en 50 Hz.....	120
Tabla 31	Vector obtenido de eficiencia a 50 Hz.....	121
Tabla 32	Vector de eficiencia a 50 Hz generado por el ajuste de curvas.....	122
Tabla 33	Potencia de entrada a la bomba en 40 Hz.....	124
Tabla 34	Vector obtenido de eficiencia a 40 Hz.....	125
Tabla 35	Vector de eficiencia a 40 Hz generado por el ajuste de curvas.....	125
Tabla 36	Potencia de entrada a la bomba en 30 Hz.....	127
Tabla 37	Vector obtenido de eficiencia a 30 Hz.....	128
Tabla 38	Vector de eficiencia a 30 Hz generado por el ajuste de curvas.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Curvas del control de caudal mediante variador de frecuencia	1
Figura 2 Curvas del control de caudal mediante estrangulamiento	2
Figura 3 Transmisor de presión Signet 8450	9
Figura 4 Sensor de presión Signet 2450.....	10
Figura 5 Transmisor de presión Signet 8550	11
Figura 6 Sensor de flujo Signet 8510 Rotor X.....	12
Figura 7 Composición del Simatic S7 – 1200.....	13
Figura 8 Módulo SM 1234.....	15
Figura 9 Variador de frecuencia Sinamics G110	16
Figura 10 Aplicación del convertor corriente a presión	17
Figura 11 Convertor Corriente a Presión Fisher 846.....	18
Figura 12 Diseño deflector / boquilla del convertor corriente a presión	19
Figura 13 Válvula bridada Badger Meter RCV	20
Figura 14 Esquema de una bomba centrífuga	21
Figura 15 TOUCH PANEL KTP 600	22
Figura 16 Registrador trifásico FLUKE 1735.....	23
Figura 17 Control de caudal por marcha-parada (ON-OFF).....	24
Figura 18 Control de caudal por estrangulamiento	25
Figura 19 Control por derivación del caudal.....	25
Figura 20 Control por velocidad variable	26
Figura 21 Curva de eficiencia de una bomba centrífuga.....	27
Figura 22 Estructura del Sistema	29
Figura 23 Diagrama del Panel Frontal	30
Figura 24 Diagrama del Panel Lateral	30
Figura 25 Diagrama de bloques del sistema	31
Figura 26 Diagrama P&ID del sistema	33
Figura 27 Diagrama de flujo del sistema	36
Figura 28 Características del motor	38
Figura 29 Acceso al menú de calibración	41
Figura 30 Código de ingreso al menú de calibración.....	42
Figura 31 Salir del menú de calibración	43
Figura 32 Acceso al menú de opciones.....	43
Figura 33 Código de ingreso al menú de opciones	43
Figura 34 Salir del menú de opciones	44
Figura 35 Acceso al menú de calibración	44
Figura 36 Código de ingreso al menú de calibración.....	45
Figura 37 Salir del menú de calibración	45
Figura 38 Acceso al menú de opciones.....	46
Figura 39 Código de ingreso al menú de opciones	46
Figura 40 Salir del menú de opciones	46
Figura 41 Esquema de configuración PLC S7-1200.....	47
Figura 42 Pantallas de configuración inicial del PLC S7-1200.....	48
Figura 43 Pantallas de configuración del módulo de E/S analógicas	49
Figura 44 Crear y asignar variables del programa	50
Figura 45 Escalamiento de la variable caudal.....	50
Figura 46 Crear objeto tecnológico PID_Compact.....	51
Figura 47 Configurar objeto tecnológico PID.....	52

Figura 48 PID para el control del caudal por estrangulamiento.....	52
Figura 49 Esquema de configuración TOUCH PANEL KTP 600	53
Figura 50 Pantallas de configuración TOUCH PANEL KTP 600.....	53
Figura 51 Programación TOUCH PANEL KTP 600.....	55
Figura 52 Pantallas HMI implementadas.....	56
Figura 53 Configuración del canal.....	57
Figura 54 Pantallas de configuración del canal.....	57
Figura 55 Configuración del dispositivo.....	58
Figura 56 Pantallas de configuración del dispositivo	58
Figura 57 Creación de tags.....	59
Figura 58 Pantallas de creación de tags	59
Figura 59 Crear un nuevo Proyecto	60
Figura 60 Diagrama de Bloques y Panel Frontal del Software LabView	61
Figura 61 Asignación del tag al indicador	61
Figura 62 Programación diagrama de bloques.....	62
Figura 63 Obtención de datos manual.....	63
Figura 64 Obtención de datos automática.....	63
Figura 65 Programación para obtener los datos de forma automática.....	64
Figura 66 Programación curvas características de frecuencia	66
Figura 67 Construcción de las curvas características de la bomba	67
Figura 68 Programación de la curva característica del Sistema.....	68
Figura 69 Programación para la construcción de las curva del sistema.....	69
Figura 70 Obtención curva característica de la bomba por estrangulamiento	70
Figura 71 Construcción de las curvas características por estrangulamiento.....	71
Figura 72 Obtención curvas características por estrangulamiento.....	72
Figura 73 Construcción de las curvas características por estrangulamiento.....	72
Figura 74 Obtención puntos de operación y cálculo de potencia hidráulica.....	73
Figura 75 Obtención de las curvas de eficiencia de la bomba centrífuga.....	75
Figura 76 Construcción de las curvas de eficiencia de la bomba centrífuga	76
Figura 77 Habilitar la herramienta Servidor Web de LabView	77
Figura 78 Publicar servidor web	77
Figura 79 Texto del servidor web	78
Figura 80 Conexión al servidor web	78
Figura 81 Conexión fase divida registrador FLUKE 1735	79
Figura 82 Pantalla de medición de potencia registrador FLUKE 1735	80
Figura 83 Conexiones eléctricas y neumáticas del Proceso.....	82
Figura 84 Curva característica de la bomba a 60 Hz	85
Figura 85 Curva característica de la bomba a 50 Hz	87
Figura 86 Curva característica de la bomba a 40 Hz	90
Figura 87 Curva característica de la bomba a 30 Hz	92
Figura 88 Curva característica de la bomba a 20 Hz	94
Figura 89 Curva característica del sistema.....	97
Figura 90 Curvas características por variador de frecuencia	97
Figura 91 Puntos de operación mediante variador de frecuencia	98
Figura 92 Datos puntos de operación por variador de frecuencia.....	99
Figura 93 Curva característica de la bomba (velocidad constante).....	102
Figura 94 Curva característica de estrangulamiento a 15 psi.....	104
Figura 95 Curva característica de estrangulamiento a 12 psi.....	106
Figura 96 Curva característica de estrangulamiento a 9 psi.....	108
Figura 97 Curva característica de estrangulamiento a 6.5 psi.....	110

Figura 98 Curva característica de estrangulamiento a 6.5 psi.....	112
Figura 99 Curvas características del control por estrangulamiento	112
Figura 100 Puntos de operación por estrangulamiento	113
Figura 101 Datos puntos de operación por estrangulamiento.....	114
Figura 102 Comparación 1 potencia consumida.....	115
Figura 103 Punto de operación por estrangulamiento comparación 1	115
Figura 104 Punto de operación por variador comparación 1	115
Figura 105 Comparación 2 potencia consumida.....	116
Figura 106 Punto de operación por estrangulamiento comparación 2.....	116
Figura 107 Punto de operación por variador comparación 2.....	116
Figura 109 Cálculo de la eficiencia de 60Hz	118
Figura 109 Curva de eficiencia a 60Hz.....	120
Figura 110 Cálculo de la eficiencia de 50Hz	121
Figura 111 Curva de eficiencia a 50Hz.....	123
Figura 112 Cálculo de la eficiencia de 40Hz	124
Figura 113 Curva de eficiencia a 40Hz.....	126
Figura 114 Cálculo de la eficiencia de 30Hz	128
Figura 115 Curva de eficiencia a 30Hz.....	130
Figura 116 Eficiencia de la bomba centrífuga a diferentes velocidades.....	130

RESUMEN

El presente trabajo de titulación se centra en la repotenciación del sistema de entrenamiento de bombas centrífugas, dicho sistema está diseñado para el análisis de las curvas características mediante el control de caudal por estrangulamiento y variador de frecuencia en bombas centrífugas, además de una comparación de la potencia consumida entre ambos métodos en el sistema y el análisis de la curva característica de eficiencia de una bomba centrífuga. El control por estrangulamiento se lo realiza mediante la implementación de una válvula de control de flujo, el control por variador de frecuencia se lo realiza mediante la implementación de un convertidor de frecuencia SINAMICS G110, las características especiales de estos instrumentos industriales hacen que sea necesaria su puesta en servicio en el sistema didáctico para el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos, permitiendo la capacitación de estudiantes en el área de la instrumentación industrial y ampliando sus conocimientos en el ámbito de redes industriales, control de procesos y controladores lógicos programables, de esta manera integrando recursos humanos, tecnológicos y competencias intelectuales se diseña e implementa dicho sistema didáctico para el análisis de las curvas de respuesta en bombas centrífugas.

Palabras Clave:

- **BOMBAS CENTRÍFUGAS**
- **INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL**
- **CONTROL DE PROCESOS**

ABSTRACT

The present work is centered in the repowering of the centrifugal pump training system. The mentioned system is designed to analyze the characteristic curves by means of the flow control by throttling control as well as rotational speed control of the centrifugal pump. In addition, the work presents a comparison of the energy consumption between the mentioned control methods in the system, as well as the analysis of the efficiency's characteristic curve of the centrifugal pump.

Throttling control is executed through the implementation of a flow control valve, the rotational speed control is accomplished by the implementation of a SINAMICS G110 variable frequency drive. The special features of the mentioned industrial instruments make compulsory its commissioning in the didactic system to be implemented in the Industrial networks and process control laboratory. The system allows the training of students in the industrial instrumentation area, as well as the improvement of the knowledge in scope of industrial networks, process control, as well as programmable logic controllers. In this way, integrating human and technologic resources, as well as intellectual capabilities, it's designed and implemented the proposed didactic system to analyze the centrifugal pump's response curves.

Keywords:

- **CENTRIFUGAL PUMP.**
- **INDUSTRIAL INSTRUMENTATION**
- **PROCESS CONTROL**

CAPÍTULO I

1. PROBLEMÁTICA

1.1. Planteamiento del problema

En el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos existen varios módulos didácticos para el estudio de procesos industriales, pero no posee una estación completa para el análisis de las curvas de respuesta en bombas centrífugas, actualmente se encuentra un sistema didáctico para la obtención del punto de operación de la interacción bomba-sistema y las curvas características del control de caudal por medio de variador de frecuencia como se puede apreciar en la Figura 1.

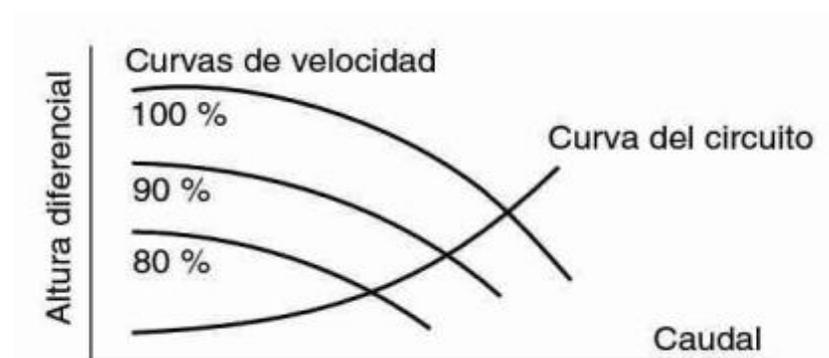


Figura 1 Curvas del control de caudal mediante variador de frecuencia

Fuente: (Sánchez J. A., 2006)

Lo que esta estación no posee es el control de caudal por estrangulamiento mediante válvula de control, para el posterior análisis de sus curvas de respuesta como se observa en la Figura 2, que es indispensable en la actualidad debido a que la gran cantidad de elementos de control final en la industria son válvulas.

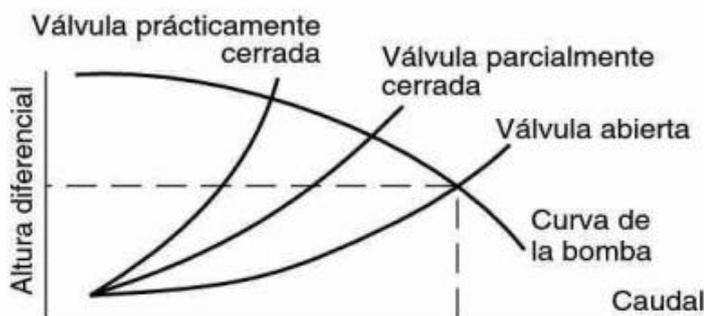


Figura 2 Curvas del control de caudal mediante estrangulamiento

Fuente: (Sánchez J. A., 2006)

Así como también en el sistema de entrenamiento de bombas centrífugas no existe una evaluación de la potencia consumida, lo que no permite determinar la potencia que existirá al implementar estos métodos de control de caudal, temática de gran importancia en la actualidad.

Y tampoco existe el análisis o la obtención de la curva de eficiencia de la bomba centrífuga. Este problema acarrea que los estudiantes en su parte formativa no conozcan de forma práctica el estudio de estos temas de gran importancia.

Entendiendo que los estudiantes no poseen un conocimiento completo de estos sistemas, se busca lograr que los mismos se familiaricen con aplicaciones industriales de caudal realizando prácticas de control en la estación a implementarse.

Entonces integrando recursos humanos, tecnológicos y competencias intelectuales se podrá diseñar e implementar dicho sistema didáctico para el análisis de las curvas de respuesta en bombas centrífugas.

1.2. Antecedentes

Los sistemas industriales han evolucionado por la necesidad de captar variables de procesos y convertirlas en una señal estándar adecuada para el instrumento receptor, esto da lugar al desarrollo continuo de estos instrumentos en sus características para cumplir con las exigencias de los procesos industriales.

La medición de caudal se la realiza por medio de transmisores industriales y para el control del mismo se utiliza diversos elementos de control final siendo las válvulas de control y en conjunto un variador de frecuencia-motor-bomba los más esenciales y más utilizados a nivel industrial en la actualidad, la válvula de control, la misma que en conjunto con un convertidor I/P podrá ser controlada desde un PLC para posteriormente en un HMI analizar las curvas características de respuesta del sistema.

Las válvulas de control son uno de los instrumentos de control más esenciales en la industria, debido a su diseño y materiales, las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos, desde los más simples hasta los más corrosivos, están equipados para entregar información importante al operador de las condiciones del proceso y el funcionamiento propio del sistema.

Los variadores de frecuencia permiten mantener un control del flujo a través del control que aplican al motor en una bomba centrífuga permitiendo generar ahorros de energía en sistemas de bombeo y reducir costos de consumo eléctrico que sean proporcional al trabajo realizado.

El diseño exterior cumple con las características más exigentes, asegurando la fiabilidad del instrumento en cualquier entorno.

1.3. Justificación e Importancia

La repotenciación del sistema de entrenamiento de bombas centrífugas para el análisis de curvas características en el control de caudal, permitirá al estudiante realizar prácticas de tal manera que conozca las prestaciones y la evolución tecnológica de la instrumentación industrial, teniendo en cuenta que en la industria se maneja una amplia gama de variables dinámicas.

Los estudiantes podrán realizar prácticas de manipulación de los transmisores, sensores y elementos de control de final, podrán observar las características y funciones principales de los instrumentos industriales ya puestos en servicio en el sistema de entrenamiento para bombas centrífugas.

Además de poder analizar y comparar la potencia consumida que existe al implementar estos accionamientos de procesos industriales, a más de reforzar conocimientos adquiridos en clase al operar dispositivos reales de nivel industrial.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

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

1.4.2. 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.
- 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.

CAPÍTULO II

2. MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO

2.1. Marco Contextual

El presente trabajo se centra en la repotenciación del banco de pruebas de bomba centrífuga, mediante la implementación del sistema de control de caudal por estrangulamiento además del análisis de curvas respectivas de los sistemas de control implementados en la estación.

Con el fin de contribuir con un recurso tecnológico para prácticas en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos, así como ampliar conocimientos en el ámbito de la instrumentación industrial.

2.2. Objeto de investigación

El objeto de la investigación de este proyecto es el de reforzar conocimientos sobre el control de caudal mediante bombas centrífugas, con métodos implementados como son: variador de frecuencia y estrangulamiento, además del análisis de las curvas de respuesta de cada sistema respectivamente.

2.2.1. Descripción del objeto de investigación

El sistema de entrenamiento usa una válvula de control y un variador de frecuencia como elementos de control final para el análisis y manejo de sistemas del control de caudal en una bomba centrífuga. Con ayuda de transmisores y sensores industriales de presión como de caudal permiten la obtención de las curvas características de respuesta de cada control implementado.

El sistema didáctico está diseñado para la utilización de prácticas en el laboratorio de Redes industriales y Control de Procesos lo cual permite la capacitación a estudiantes en el área de la instrumentación industrial.

El control de caudal implementa un lazo cerrado en el cual el fluido circula desde y hacia el tanque reservorio, para la obtención de las curvas de respuesta mediante el método de estrangulamiento, se utiliza una válvula de control de flujo conectada al respectivo convertidor I/P, que podrá ser manipulado desde el PLC, el mismo que está conectado a un variador de frecuencia que actúa sobre una bomba centrífuga de forma proporcional a la acción de control.

Se diseñó el algoritmo correspondiente para el monitoreo y visualización del caudal, además de las respectivas curvas de respuesta. En conjunto permiten ejecutar un método eficiente de control del caudal que pasa dentro de la tubería.

El ingreso de parámetros se lo realiza desde un panel digital con una ubicación estratégica para facilidad del operador o desde un ordenador por medio de una interfaz gráfica que es desarrollada en el software Labview.

Las acciones de control son realizadas por el PLC, el mismo que se encarga de procesar todas las señales que ingresen a este y determinar mediante la programación realizada acciones para lograr condiciones de operación requerida.

Además se puede analizar una comparación de la potencia consumida entre ambos controles implementados para el control de caudal en bombas centrífugas.

2.3. Marco teórico

2.3.1. Fundamentación Teórica

El repotenciado banco de pruebas de bombas centrífugas, se encuentra comprendido por dispositivos y equipos industriales. Específicamente, está conformado por transmisores Georg Fischer de Flujo y Presión con sus respectivos sensores, PLC S7 – 1200 acompañado del módulo de entradas y salidas analógicas, variador de frecuencia SINAMICS G110, Válvula de control Badger Meter, Touch Panel KTP 600, bomba centrífuga; todos los dispositivos en conjunto ayudan a la obtención de las curvas características del control de caudal por variador de frecuencia así como por estrangulamiento.

2.3.2. Transmisores Industriales

Transmisor industrial es un dispositivo que capta una señal de proceso por medio del elemento primario (también conocido como sensor), dicha señal es amplificada y acondicionada para ser transmitida a distancia en forma de señal neumática, electrónica, digital, óptica, hidráulica o por radio. (Solé, 2012)

Las principales señales utilizadas en la instrumentación son: La señal neumática, de 3 a 15 psi. La señal eléctrica normalizada es de 4 a 20 mA de corriente continua. La señal digital consiste en una serie de impulsos en forma de bits. (Solé, 2012)

2.3.3. Transmisores electrónicos

Los transmisores electrónicos convierten la señal del proceso a una señal de 4 a 20 mA de c.c. Generalmente, su exactitud suele ser del 0.3%. El transmisor electrónico es alimentado por una fuente de 24 V c.c., así como de un circuito de dos hilos. Estos instrumentos no pueden guardar señales de

planta, ya que no poseen un microprocesador incorporado en el mismo. (Solé, 2012)

2.3.4. Transmisor de presión georg fischer signet 8450

El transmisor de presión Signet 8450 como se muestra en la Figura 3, es un instrumento único que ofrece una pantalla local o remota, así como salidas de relé y corriente. Ofrece repetitividad y exactitud excepcionales sobre un amplio rango de operación de presión. El instrumento está disponible en configuraciones de montaje de panel y de campo, con entrada de canal simple o canal doble y se encuentra equipado con una salida de 4 a 20 mA. Este dispositivo es completamente escalable y reversible para cada canal de entrada. La flexibilidad de la configuración se maximiza con relés opcionales para control de procesos. La unidad también tiene la capacidad de aceptar otros sensores con salida de 4 a 20 mA, a través del convertidor de señal Signet 8058. (Fischer, 2016)



Figura 3 Transmisor de presión Signet 8450

Fuente: (Fischer, 2016)

2.3.5. Sensor de presión georg fischer signet 2450

El sensor de presión Signet 2450 como se muestra en la Figura 4, está conformado por un cuerpo de una pieza moldeada por inyección de PVDF, así como de un diafragma cerámico para obtener como resultado una compatibilidad superior en los líquidos corrosivos. Las tres versiones existentes de la gama de presión permiten obtener una resolución óptima adaptada a sus necesidades de detección. El sensor posee circuitos de estado sólido, con la funcionalidad de eliminar la deriva (carece de potenciómetros internos.) de compensación de temperatura incorporado, lo cual provee una precisión excepcional sobre amplios rangos de temperatura.

Estos sensores están disponibles con una salida específica analógica de 4 a 20mA. Además, los duales extremos roscados permiten la inmersión en recipientes de proceso, o la instalación en línea con conexión de conducto (Fischer, 2016)



Figura 4 Sensor de presión Signet 2450

Fuente: (Fischer, 2016)

2.3.6. Transmisor de flujo georg fischer signet 8550

El transmisor de flujo Signet 8550 como se muestra en la Figura 5, es una solución avanzada que convierte la señal de todos los sensores de flujo Signet a la señal de 4 a 20 mA para transmitir la misma a largas distancias. La flexibilidad de configuración del transmisor es maximizada con dos relés opcionales para el control de procesos, existe la opción de montura en panel, así como montura en tubería, y escalabilidad para prácticamente cualquier rango de caudal o unidad de ingeniería. De acuerdo con el estado del arte de su diseño electrónico, se encuentra asegurada la confiabilidad a largo plazo, la estabilidad de la señal, y la simplicidad en la configuración y operación por parte del usuario. (Fischer, 2016)



Figura 5 Transmisor de presión Signet 8550

Fuente: (Fischer, 2016)

2.3.7. Sensor de flujo rueda de paletas georg fischer signet 8510

El sensor de flujo Signet 8510 Rotor-X como se muestra en la Figura 6, posee alta repetitividad. Debido a la selección de materiales, tales como el polipropileno y el PDVF, éste sensor es químicamente compatible con diversas soluciones líquidas de procesos. El sensor mide el flujo del líquido en las tuberías completas, de igual manera, es compatible con sistemas de baja presión; además es un sensor que brinda resistencia, a su vez, ofrece un valor excepcional. Posee facilidad de instalación y alta confiabilidad a largo

plazo con poco o ningún mantenimiento. Además, el sensor posee detección de flujo en ambas direcciones. (Fischer, 2016)



Figura 6 Sensor de flujo Signet 8510 Rotor X

Fuente: (Fischer, 2016)

2.3.8. Controlador lógico programable

Un autómata programable es un sistema de control basado en un microprocesador, así como los elementos necesarios para su operación. La función que realiza el dispositivo es el de satisfacer cada necesidad específica de control, de tal manera que el PLC se convierte en una herramienta útil y flexible.

El PLC es un elemento de control de procesos de propósito general, el cual se amolda a prácticamente todas las necesidades de automatización. Éste debe ser un elemento de ayuda para el usuario final, por lo tanto, el PLC se sitúa como un proceso automático basado en el flujo de información del proceso hacia el PLC y viceversa en forma de lazo cerrado, de manera que con la acción de control del PLC, se ejecuta la ley de mando necesaria para que el proceso obedezca de forma autónoma a su fin. (Peña, 2003)

2.3.9. PLC S7 – 1200

El controlador lógico programable (PLC) S7 – 1200 brinda la capacidad de cumplir con las distintas tareas de automatización mediante el control de una gran variedad de dispositivos. Por su amplio juego de instrucciones, la flexibilidad en su configuración y lo compacto de su diseño, éste autómata programable es el indicado para controlar una amplia variedad de aplicaciones.

La CPU cuenta con un microprocesador, integra una fuente de alimentación, así como circuitos de entrada y salida en una carcasa compacta, con lo cual se conforma un potente PLC. Una vez cargado el programa en la CPU, ésta realiza las operaciones de vigilancia y control de los dispositivos de la aplicación, ya que contiene la lógica necesaria para realizar las acciones ya descritas. La CPU vigila las entradas y cambia el estado de las salidas de acuerdo a la lógica del programa que se encuentre cargado en el autómata, dicho programa puede incluir lógica booleana, instrucciones de contaje y temporización, funciones matemáticas complejas, así como comunicación con otros dispositivos mediante interfaz PROFINET, la cual se encuentra incorporada en el dispositivo (Siemens, Simatic S7 - 1200, 2016). En la Figura 7, se puede observar el dispositivo y las partes que lo componen.

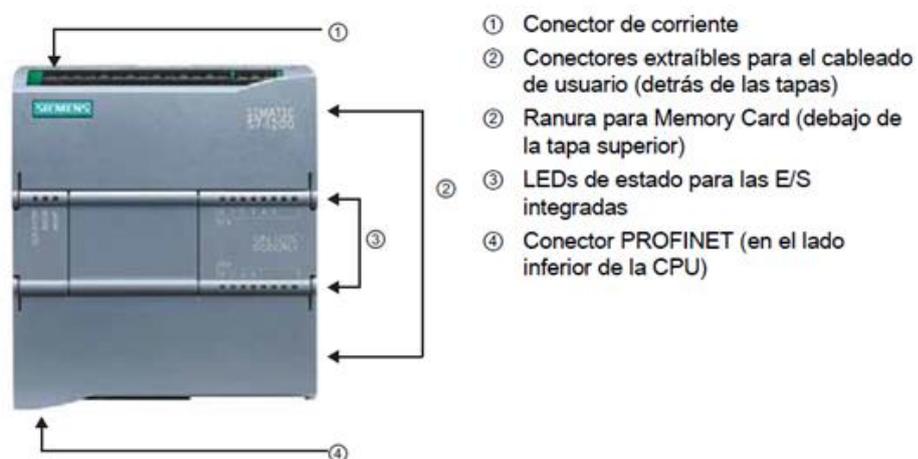


Figura 7 Composición del Simatic S7 – 1200

Fuente: (Siemens, Simatic S7 - 1200, 2016)

2.3.10. Interfaces de entrada/salida

Las Interfaces de entrada/salida son los módulos del autómata programable que se encargan de realizar la unión o interfaz entre la planta o proceso y la CPU. En los módulos mencionados se realizan una serie de acondicionamientos de la señal eléctrica que se requiere que ingrese o salga del autómata programable. Los módulos de entrada se encargan de amplificar la señal de entrada que proviene del transmisor, adapta los niveles de tensión de la señal, filtra la señal y la codifica para el procesamiento de la misma de forma adecuada por la CPU. Por otra parte, los módulos de salida están encargados de decodificar la información que proviene de la memoria, amplificar la señal decodificada, y adaptar los niveles de tensión de la señal de salida. (Peña, 2003)

2.3.11. Módulo de E/S analógicas Sm1234

El módulo de entradas/salidas analógicas Signal Module 1234 como se muestra en la Figura 8, transforma las señales analógicas del proceso en señales digitales para su aplicación en el autómata programable S7 – 1200; a su vez, transforma las señales digitales provenientes del PLC S7 – 1200 para el respectivo control de procesos. El dispositivo cuenta con cuatro entradas diferenciales tipo corriente o tensión, las cuales permiten un máximo de 35 Voltios y 40 miliamperios en tensión y corriente respectivamente. Sin embargo, los rangos de entrada que presenta son: Tensión: $\pm 10V$, $\pm 5V$, y $\pm 2.5V$; Corriente: 4 a 20mA y de 0 a 20mA. Los rangos de salida presentados son: Tensión: -10V a 10V, y en corriente: 4 a 20mA y de 0 a 20mA. Cabe recalcar que el dispositivo presenta hasta 14 bits de resolución más el signo, así como los rangos de entrada y salida mencionados permiten la conexión de sensores y actuadores sin la necesidad de utilizar amplificadores adicionales. (Siemens, Industry Mall, 2016)



Figura 8 Módulo SM 1234

Fuente: (Siemens, Industry Mall, 2016)

2.3.12. Elementos de control final

Los elementos de control final son aquellos dispositivos que poseen un mecanismo que altera el valor de una variable de referencia la cual se está manipulando, todo esto en base a una señal de respuesta a la salida del dispositivo de control automático. Los elementos de control por lo general siempre constan de dos partes importantes: un actuador el cual convierte la señal del controlador y un mecanismo para poder ajustar la variable manipulada a los parámetros que requiere el proceso.

2.3.13. Variador de frecuencia Sinamics G110

Un variador de frecuencia es un dispositivo cuyo fin es modificar la frecuencia y, por lo tanto, la velocidad de un motor; es decir, genera una corriente alterna con la frecuencia necesaria para accionar el motor de corriente alterna. Al modificar el valor de la frecuencia, el variador modifica la velocidad del motor independientemente de la frecuencia de la red de alimentación. (Álvarez Pulido, 2000)

Entre sus ventajas se tiene:

- Ahorro de energía, ya que consume solamente lo necesario en cada instante.
- Control a distancia mediante cualquier sistema automático.
- Conexión de varios motores en paralelo.
- Brinda la manera de conseguir una velocidad constante sin importar la carga.
- Capacidad para programar el tiempo de arranque, freno y parada. (Álvarez Pulido, 2000)

El variador de frecuencia Sinamics G110, como se muestra en la Figura 9, controla la velocidad de motores trifásicos de corriente alterna. Es controlado por un microprocesador e incorpora la tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Lo cual hace del dispositivo versátil y confiable. Un método de modulación especial del ancho de pulso con la frecuencia del pulso seleccionable permite la operación del motor con menos ruido. (Siemens, Sinamics G110, 2016)

El equipo posee protección de sobretensión, sobre temperatura, falla de tierra, protección de cortocircuitos. Es de fácil instalación, posee una salida digital, tres entradas digitales, una entrada analógica que soporta tensiones de 0 a 10 Voltios. (Siemens, Sinamics G110, 2016)



Figura 9 Variador de frecuencia Sinamics G110

Fuente: (Siemens, Sinamics G110, 2016)

2.3.14. Conversor Corriente a Presión

El conversor corriente a presión transforma una señal eléctrica de corriente (I), producida por una variación del sensor de 4mA a 20mA, a una señal neumática (P), cuyo rango es de 3 a 15 psi, ambos valores, respectivamente, son valores estandarizados usados en la industria de control de procesos.

Las señales neumáticas son usadas a menudo para operar un actuador neumático, el mismo que causa una variación del caudal del fluido en una tubería. La Figura 10, muestra un lazo de control que utiliza un conversor corriente a presión. Un regulador de presión suministra una señal neumática de 20 psi al transductor localizado cerca de una válvula neumática que controla el caudal del proceso. El conversor recibe una señal eléctrica de un controlador y produce una señal neumática analógica proporcional. (Bartelt, 2006)

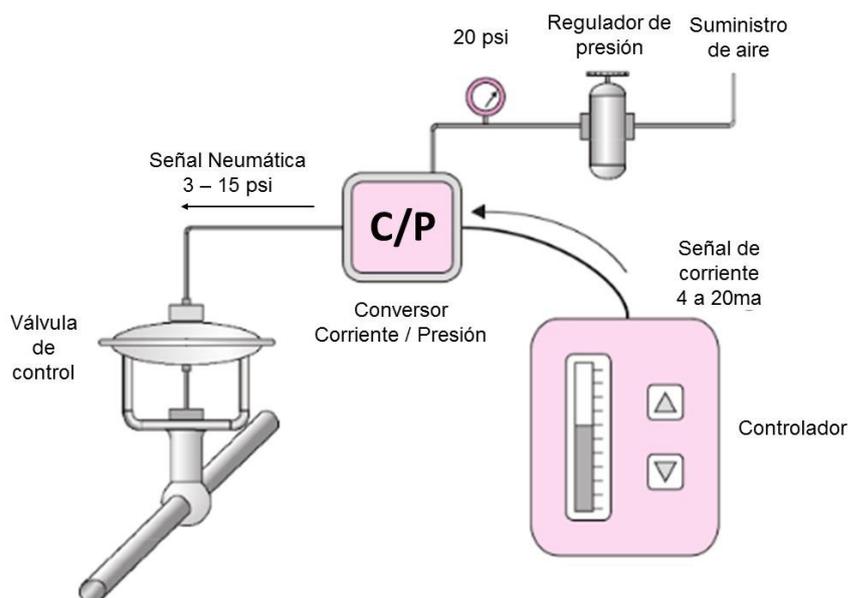


Figura 10 Aplicación del conversor corriente a presión

Fuente: (Bartelt, 2006)

2.3.15. Conversor Corriente a Presión Fisher 846

El transductor electro-neumático Fisher 846, que se muestra en la Figura 11, es un transductor robusto, montado en el campo, que admite una señal de entrada eléctrica y la convierte en una señal de salida neumática. Normalmente, la señal de 4 a 20 mA es convertida a 0,2 a 1,0 bar (3 a 15 psi). En la aplicación más común, el transductor convierte una señal de salida eléctrica de un controlador a la señal neumática necesaria para operar un actuador de válvula o posicionador neumático. (Emerson, 2016)



Figura 11 Conversor Corriente a Presión Fisher 846

Fuente: (Emerson, 2016)

El transductor incluye un diseño de deflector / boquilla, como se muestra en la Figura 12, que consta de dos boquillas situadas de modo que el flujo de aire constante que sale de la boquilla de suministro es dirigido a la entrada de la boquilla receptora. Cada boquilla posee un orificio grande de 0,41 mm (0,016 pulgadas), que proporciona una buena resistencia a la obstrucción. La señal de corriente de entrada sitúa una barra deflectora en función a la corriente de flujo de la boquilla. Como la señal de entrada cambia, la barra deflectora se mueve para alterar el flujo a la boquilla del receptor, de tal manera que se establece una presión en la boquilla del receptor. La presión piloto, a su vez, controla la etapa de refuerzo y la salida del conversor. (Emerson, 2016)

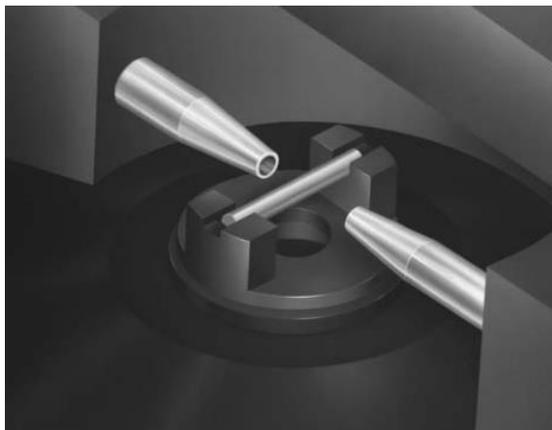


Figura 12 Diseño deflector / boquilla del convertor corriente a presión

Fuente: (Emerson, 2016)

2.3.16. Válvula bridada Badger Meter RCV

Las válvulas automáticas son el componente del lazo de control que modifica el paso del fluido, a través de un orificio con restricción variable, en función de la señal procedente del controlador. Al modificar el caudal de paso modifica a su vez el valor de una variable de proceso, por ejemplo: presión en un recipiente, temperatura de un intercambiador, etc. Las válvulas de control generalmente están constituidas por dos partes: la primera es el actuador que es aquel que recibe la señal de controlador y la transforma en un desplazamiento lineal o rotacional dependiendo de la construcción de la válvula, y segundo el cuerpo que viene constituido por el vástago que hace que cambie el paso del fluido y por ende el caudal. (Sánchez J. A., 2006)

La válvula bridada Badger Meter RCV como se muestra en la Figura 13, es adecuada para el control de la variable flujo en el proceso, este dispositivo tiene incluido un posicionador el cual estabiliza la acción de control, el rango estándar de control de aire es de 3 a 15 psi y el punto de apertura o cierre se lo puede hacer mediante el ajuste del zero ubicado en parte superior de la válvula, para que esta válvula de control proporcional pueda trabajar de manera correcta también necesita de un suministro de presión de aire como alimentación de 22 psi como mínimo. Puesta en servicio realiza las acciones del control de caudal de manera eficiente y precisa haciendo de este instrumento útil en procesos industriales. (Meter, 2016)



Figura 13 Válvula bridada Badger Meter RCV

Fuente: (Meter, 2016)

Al ser esta válvula proporcional bridada, hace que sea necesaria la instalación de tubería de hierro galvanizado en el proceso que sea requerido debido a su robustez y gran tamaño.

2.3.17. Bomba centrífuga

La bomba centrífuga como se muestra en la Figura 14, permite transportar líquidos de un lugar a otro mediante el uso de tuberías, teniendo así un amplio campo de aplicaciones a nivel de procesos industriales. Debido a su gran velocidad de funcionamiento el fluido que entra por el centro del rodete es impulsado hacia el exterior por efecto de la fuerza centrífuga que este ejerce.

Composición:

- Posee una tubería de aspiración.
- El rodete el cual es un conjunto de álabes que giran dentro de una carcasa circular, el fluido ingresa por la tubería de aspiración hasta el rodete, notando un cambio de dirección y acelerándose.
- Los álabes del rodete someten a las partículas de fluido a que tengan un movimiento de rotación muy rápido siendo enviadas hacia el exterior mediante la fuerza centrífuga.

- La voluta en forma de caracol alrededor del rodete es el que se encarga de recoger el fluido que deja el rodete a gran velocidad y lo encamina hacia la brida de impulsión de la bomba.
- Posee una tubería de impulsión a la salida de la voluta donde el fluido es evacuado. (Guillermo, 2016)

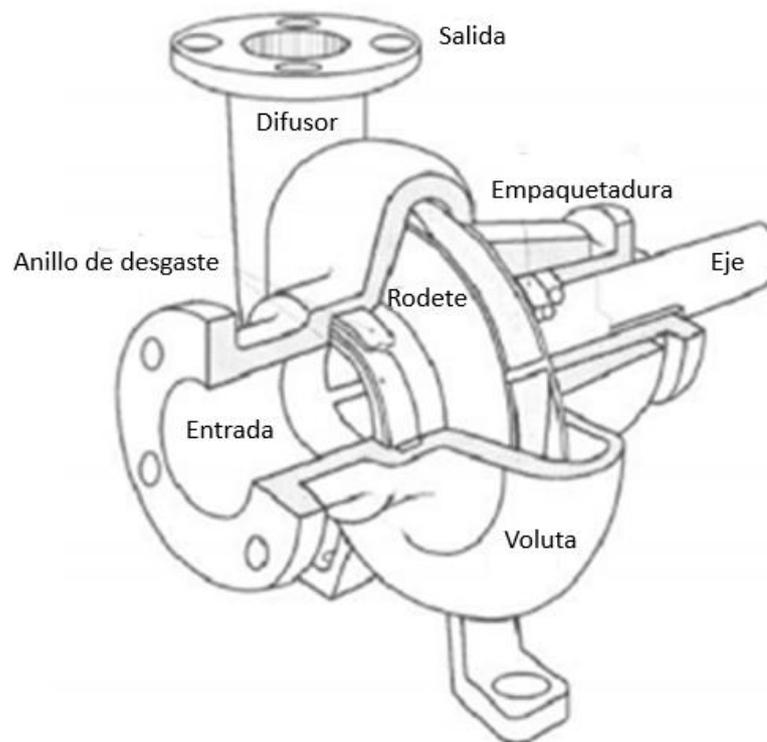


Figura 14 Esquema de una bomba centrífuga

Fuente: (Guillermo, 2016)

2.3.18. Touch Panel Simatic KTP 600

Los procesos industriales en la actualidad requieren de interfaces de visualización para mejor entendimiento del proceso así como para poder operarlo de una manera más intuitiva. Los paneles Simatic KTP 600 como se muestra en la Figura 15 se pueden utilizar en cualquier lugar donde se desee el monitoreo o la operación de algún proceso, en ellos se puede realizar un HMI en el cual se pueda visualizar representar o controlar los datos del proceso que se requiere, además de permitir niveles de jerarquía para los usuarios que ingresen al mismo. (Siemens, Simatic KTP 600, 2016)

Características:

- Pantalla de visualización de 5.7 pulgadas.
- 6 teclas táctiles configurables libremente.
- Funcionalidad basada en HMI para informes, gráficos, fórmulas.
- Utiliza software de configuración de WinCC flexible y Step 7 (TIA PORTAL). (Siemens, Simatic KTP 600, 2016)

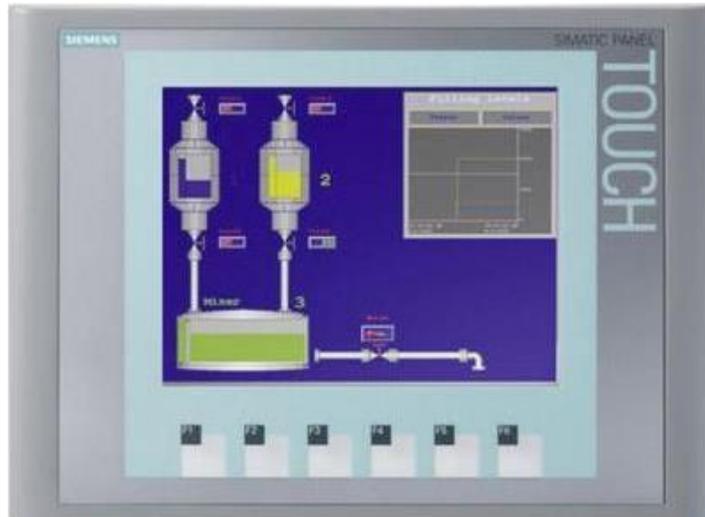


Figura 15 TOUCH PANEL KTP 600

Fuente: (Siemens, Simatic KTP 600, 2016)

2.3.19. Registrador trifásico FLUKE 1735

El registrador trifásico FLUKE 1735, como se muestra en la Figura 16, es un medidor de potencia ideal en el campo técnico, este dispositivo permite ejecutar estudios de energía eléctrica así como el registro de datos del mismo. Además es capaz de realizar estudios de carga, evaluaciones de energía para de esta manera poder justificar el ahorro de energía en el proceso implementado, medidas de armónicos y capturar eventos de tensión. (FLUKE, 2017)

Características:

- Registro de parámetros de energía eléctrica.
- Supervisión de la demanda de potencia.

- Comprobar el consumo de energía.
- Medida de armónicos.
- Mejora de la fiabilidad.
- Medida de las tres fases y el neutro.
- Visualización de gráficos y generación de informes mediante el software PowerLog. (FLUKE, 2017)



Figura 16 Registrador trifásico FLUKE 1735

Fuente: (FLUKE, 2017)

2.3.20. Métodos de control de caudal para bombas centrífugas

Existen diversas formas para el control de caudal en bombas centrífugas, como son:

- Control por marcha-parada (ON-OFF).
- Control por estrangulamiento en la línea de impulsión.
- Control por derivación de caudal.
- Control por velocidad variable. (Sánchez J. A., 2006)

El método de control de caudal por marcha parada es el único que puede ocasionar daños en los equipos debido a los cambios de frecuencia bruscos que puedan existir. Dependiendo del diseño los métodos del control

de caudal por estrangulamiento y por derivación de caudal los costos pueden ser altos cuando el proceso opera a bajo caudal y no requiere de estos instrumentos industriales, mientras que el método de velocidad de giro disminuye los costos de operación pero la inversión puede ser de igual manera altos. (Sánchez J. A., 2006)

2.3.21. Control de caudal por marcha-parada (ON-OFF)

Con este tipo de control existe un riesgo de fallo debido a que puede haber mayor o menor frecuencia al arranque y al paro de la bomba centrífuga. En la Figura 17 se puede apreciar un ejemplo de este tipo de control en el cual se observa el control de nivel de un tanque en el que se va acumulando volumen, pero no es suficiente para mantener la bomba trabajando continuamente. (Sánchez J. A., 2006)

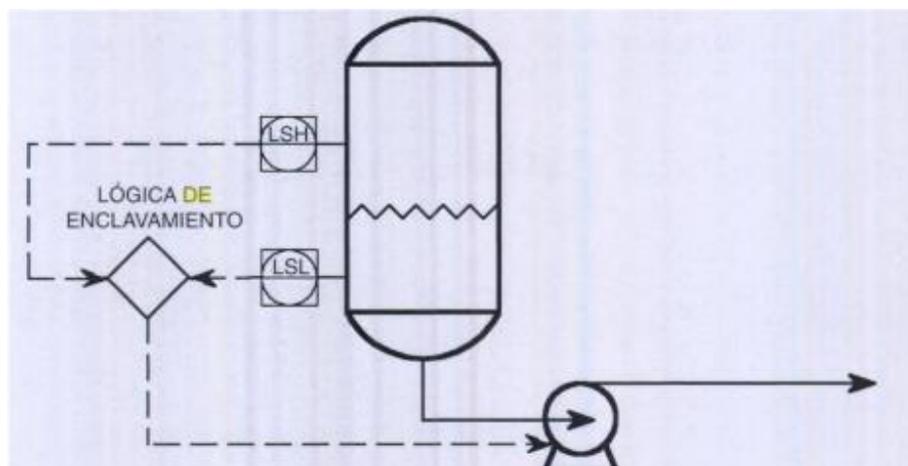


Figura 17 Control de caudal por marcha-parada (ON-OFF)

Fuente: (Sánchez J. A., 2006)

2.3.22. Control por estrangulamiento de la impulsión

En este método de control de caudal para bombas centrífugas, la pérdida de carga de la válvula de control automática se suma a la del resto del sistema, cuando la válvula se cierra completamente la bomba alcanza la máxima presión, es decir, la bomba está batiendo continuamente el fluido y por ende aumenta la temperatura hasta que se logre descargar el fluido del mismo. (Sánchez J. A., 2006)

La Figura 18, muestra las curvas características de este tipo de control en el cual se puede apreciar que a medida que se va cerrando la válvula de control en forma proporcional, disminuye el caudal pero se alcanza una mayor presión diferencial (altura total), es decir, que la bomba está consumiendo energía como si siempre estuviera trabajando al máximo del caudal.

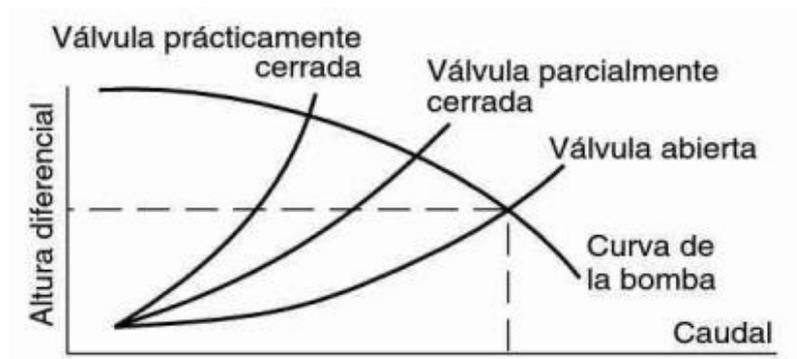


Figura 18 Control de caudal por estrangulamiento

Fuente: (Sánchez J. A., 2006)

2.3.23. Control por derivación de caudal

En algunos procesos la bomba debe permanecer en funcionamiento continuo así el caudal sea alto o bajo, en la Figura 19 se muestra este tipo de operación, el medidor que se encuentra situado a la salida de la bomba mide el caudal total a la impulsión mientras que el medidor situado después de la bifurcación mide el caudal del proceso, es así que cuando el caudal es inferior al mínimo exigido por requisitos del proceso la diferencia de estos se recircula a la aspiración para de esta manera proteger la bomba. (Sánchez J. A., 2006)

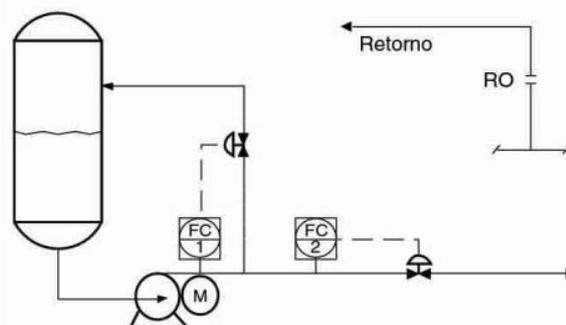


Figura 19 Control por derivación del caudal

Fuente: (Sánchez J. A., 2006)

2.3.24. Control con velocidad variable

En la Figura 20, se puede apreciar las curvas características de este tipo de control, el cual nos indica que a medida que va disminuyendo la velocidad de operación de la bomba centrífuga disminuye el caudal así como la presión diferencial (altura total), de tal manera la bomba está consumiendo solo la energía necesaria para impulsar el caudal en el proceso. En este tipo de control se lleva a cabo por medio de turbinas de vapor o por motores eléctricos con variadores de frecuencia, no existe una válvula automática que se suma a las pérdidas de carga del sistema por lo que lo hace un control que disminuye la potencia consumida en los procesos industriales. (Sánchez J. A., 2006)

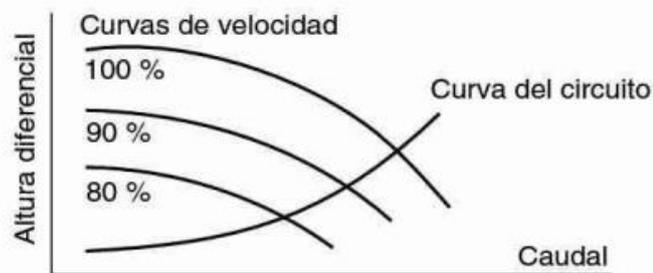


Figura 20 Control por velocidad variable

Fuente: (Sánchez J. A., 2006)

2.3.25. Eficiencia en bombas centrífugas

Las curvas características del rendimiento en una bomba centrífuga ayudan a proporcionar una herramienta de trabajo útil para garantizar el funcionamiento óptimo de estos equipos. La eficiencia de la bomba se describe como el trabajo realizado al impulsar un flujo de un lugar a otro en función de la presión diferencial (altura total) y el peso del líquido bombeado en un tiempo determinado. En la Figura 21 se puede apreciar la curva característica de rendimiento de una bomba centrífuga, todas las máquinas que transforman energía no siempre son 100 % eficientes ya que para ciertos equipos la potencia de entrada no siempre es la misma a la salida debido en

que en ciertos lugares se pudo producir una pérdida energética debido a pérdidas de potencia hidráulica, pérdidas de potencia volumétrica o pérdidas de potencia mecánicas.

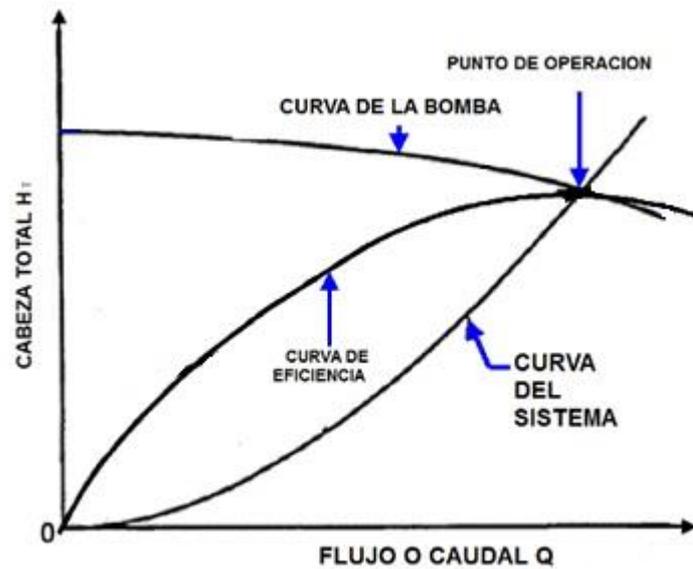


Figura 21 Curva de eficiencia de una bomba centrífuga

Fuente: (UNAD, 2016)

CAPITULO III

3. DESARROLLO DEL SISTEMA

3.1. Requisitos del sistema

En el presente capítulo se describe las configuraciones y programación necesaria de los instrumentos que conforman el banco de pruebas de bomba centrífuga, el desarrollo del sistema está orientado a la obtención de las curvas características del control de caudal mediante los métodos de control de variador de frecuencia y por estrangulamiento, para posteriormente realizar un análisis de la potencia consumida entre los dos controles, así como la eficiencia de la bomba centrífuga.

El controlador lógico programable (PLC) es el encargado de la adquisición de datos de las variables de caudal y presión, las mismas que son enviadas como señal estándar de corriente de 4 a 20 mA mediante transmisores industriales, además el PLC es el encargado de realizar las acciones de control tanto para el variador de frecuencia con señal de 0 a 10 V para regular la velocidad de operación de la bomba centrífuga y para el convertidor I/P con señal de 4 a 20 mA, el mismo que se encarga de dar una señal de salida de 3 a 15 psi para el control de la válvula proporcional puesta en servicio en el proceso.

Las variables de caudal y presión pueden ser monitoreadas desde la TOUCH SCREEN, también desde el mismo se puede realizar control de la variable caudal por estrangulamiento de la válvula proporcional y por variador de frecuencia. El PLC envía toda la información procesada a través de una red Ethernet a un OPC para enlazar la comunicación entre el PLC y el computador con el software Labview, en el cual se generan y analizan las curvas características de los métodos implementados en el sistema.

3.2. Estructura del sistema

El diseño de la estructura del sistema de entrenamiento para bomba centrífuga fue desarrollado en el software AutoCAD como se muestra en la Figura 22 sección (a) y el banco de pruebas de bomba centrífuga ya estructurado e implementado se encuentra en la sección (b).

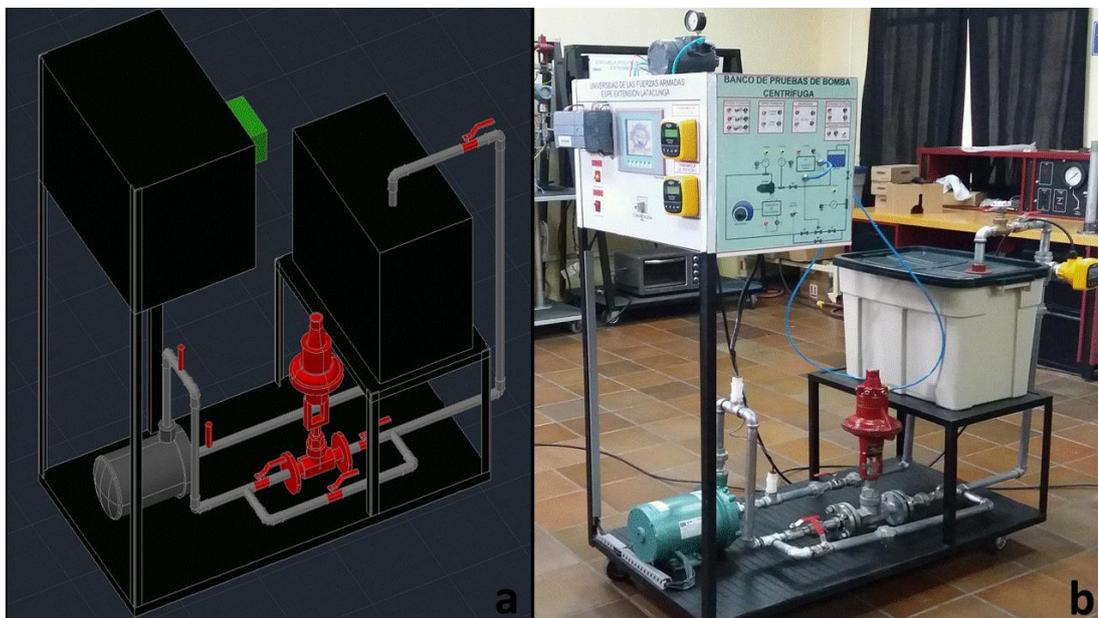


Figura 22 Estructura del Sistema

3.3. Diagramas de Panel

3.3.1. Diagrama del Panel Frontal

En la Figura 23, se muestra el diagrama del panel frontal del sistema de entrenamiento para bomba centrífuga en el cual se encuentra ubicado: PLC S7-1200, módulo de entradas y salidas analógicas SM 1234 AI/AQ, Touch Screen, Conector de comunicación Profinet, Botón de encendido, Botón de arranque de la bomba y Transmisores de presión.

3.4. Diagrama de Bloques del sistema

En la Figura 25, se muestra el diagrama de bloques del sistema sin tomar a consideración si es lazo abierto o lazo cerrado.

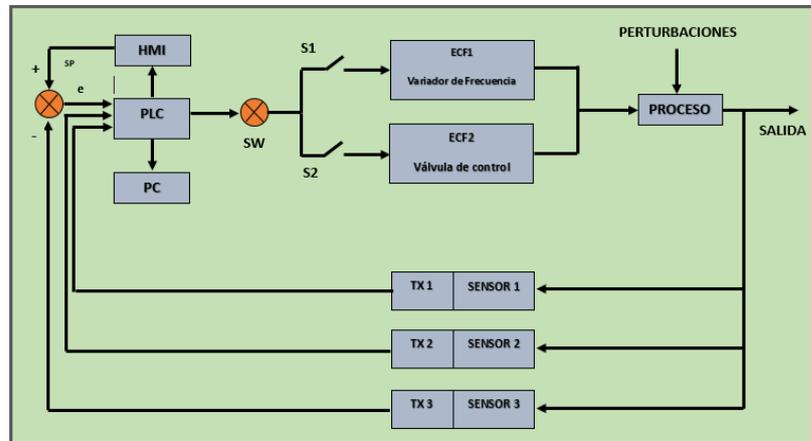


Figura 25 Diagrama de bloques del sistema

HMI: Interfaz Humano Máquina (KTP600), el usuario tiene la capacidad de establecer el valor del set point, monitorear las variables del proceso y realizar control de caudal por variador de frecuencia y por estrangulamiento.

PLC: Controlador Lógico Programable (Siemens S7-1200 CPU 1214C y módulo SM 1234 AI/AQ), se encarga de realizar las funciones de control, adquisición de datos, gestionar las comunicaciones con el HMI y la PC.

PC: El usuario adquiere y visualiza las curvas características del control de caudal mediante estrangulamiento y por variador de frecuencia de la bomba centrífuga, realiza una comparación de la potencia consumida de los controles implementados, adquiere curvas de eficiencia de la bomba y realiza funciones de control.

SW: Interruptor de control manual o local para el banco de pruebas para bomba centrífuga.

ECF1 (Variador de frecuencia): Dispositivo que controla la velocidad de operación de la bomba centrífuga con respecto a una señal de control emitida por el PLC o a una señal analógica proporcionada por un potenciómetro, su función principal es variar el flujo que circula por la tubería de forma proporcional.

ECF2 (Válvula de control): Dispositivo que controla la velocidad de operación de la bomba centrífuga con respecto a una señal de control emitida por el PLC hacia un conversor de corriente a presión, su función principal es variar el flujo que circula por la tubería de forma proporcional.

PROCESO: Proceso de caudal constituido por la bomba centrífuga, tanque de almacenamiento, válvula de control con uniones bridadas y la conexión de la tubería de acero galvanizado que va desde el tanque a la bomba y viceversa.

SENSOR 1: Sensor de presión manométrica (Sensor de presión Signet 2450), mide la variable física de presión a la impulsión del caudal de la bomba centrífuga.

SENSOR 2: Sensor de presión manométrica (Sensor de presión Signet 2450), mide la variable física de presión a la succión del caudal de la bomba centrífuga.

SENSOR 3: Sensor de rueda de paletas (Sensor de Flujo de rueda de paletas, Rotor-X Signet 8510), mide la variable física del caudal y entrega a la salida una señal en frecuencia.

TX 1: Transmisor de presión (Transmisor de presión Georg Fischer Signet 8450-1), toma el valor de la variable física del sensor 1 y la transmite mediante una señal estándar de corriente al PLC.

TX 2: Transmisor de presión (Transmisor de presión Georg Fischer Signet 8450-1), toma el valor de la variable física del sensor 2 y la transmite mediante una señal estándar de corriente al PLC.

TX 3: Transmisor de flujo (Transmisor de flujo Georg Fischer Signet 8550-1), toma el valor del caudal del sensor 3 y la transmite mediante una señal estándar de corriente al PLC.

3.5. Diagrama P&ID del sistema

El presente diagrama P&ID de la Figura 26, indica un esquema general del sistema de entrenamiento de bomba centrífuga, el mismo se encuentra bajo las normas ISA 5.1, ISA 5.3, las cuales son ampliamente aplicadas en la industria, así como en la automatización, los elementos utilizados en el diagrama se explican a continuación:

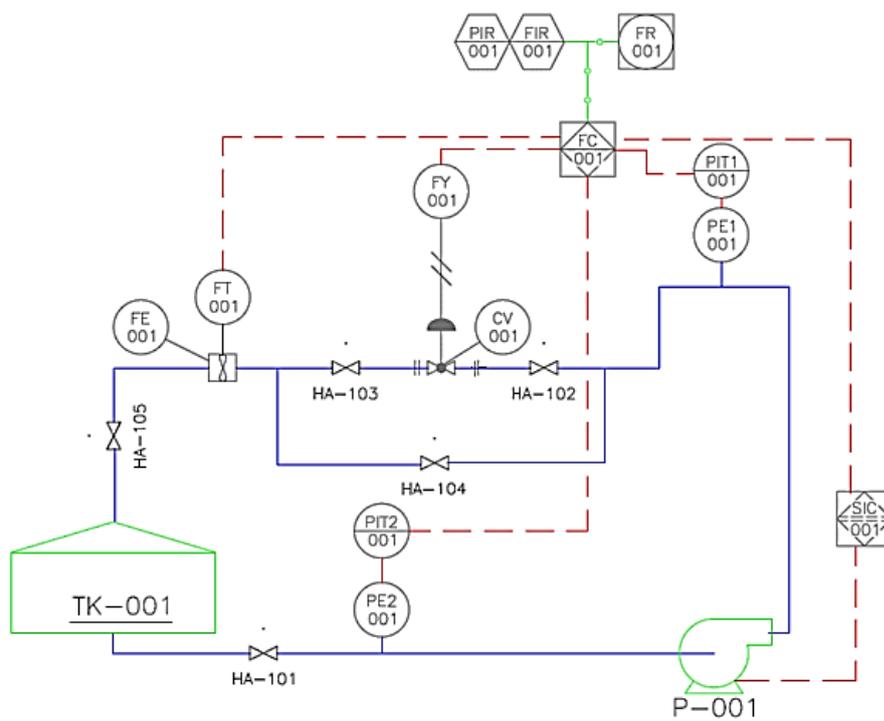


Figura 26 Diagrama P&ID del sistema

Bomba Centrífuga (P – 001) Corresponde a la bomba Centrífuga, de la cual se obtienen las curvas características. Cumple la función de succión e impulsión del fluido.

Tanque (TK – 001) Correspondiente al tanque de almacenamiento de líquido del sistema, el mismo posee realimentación, con una capacidad de 60 litros.

Válvulas (HA – 101, HA – 105) Válvulas manuales de tipo bola, cuya función es provocar perturbaciones en el sistema, así como cerrar el paso del fluido para desmontar la bomba y el tanque para su reemplazo o mantenimiento.

Válvulas (HA – 102, HA – 103, HA – 104) Válvulas manuales de tipo bola que realiza la función de bypass para el montaje o mantenimiento de la válvula de control presente en el sistema.

Elemento Primario de Presión 1 (PE1) Sensor de presión Signet 2450, ubicado en el sistema para medir la variable presión a la impulsión del caudal de la bomba centrífuga, posee una conexión eléctrica con el transmisor indicador de presión PIT1.

Transmisor Indicador de Presión 1 (PIT1) Transmisor de presión Georg Fischer Signet 8450-1, transforma las señales del sensor de presión 1 a señales estándar de 4 a 20mA. Se encuentra ubicado en el panel frontal del sistema; a su vez, su señal de salida se encuentra conectada en una de las entradas analógicas del controlador.

Elemento Primario de Presión 2 (PE2) Sensor de presión Signet 2450, ubicado en el sistema para medir la variable presión a la succión del caudal de la bomba centrífuga, posee una conexión eléctrica con el transmisor indicador de presión PIT2.

Transmisor Indicador de Presión 2 (PIT2) Transmisor de presión Georg Fischer Signet 8450-1, transforma las señales del sensor de presión 2 a señales estándar de 4 a 20mA. Se encuentra ubicado en el panel frontal del sistema; a su vez, su señal de salida se encuentra conectada en una de las entradas analógicas del controlador.

Elemento Primario de Flujo (FE) Sensor de flujo de paletas, simbolizado como elemento primario de turbina en el diagrama P&ID por la similitud de su modo de operación, corresponde al sensor GF Signet 8510, conectado en campo directamente con el transmisor de flujo.

Transmisor Indicador de Flujo (FIT) Transmisor de Flujo Georg Fischer Signet 8550-1, se encarga de convertir la señal del sensor de flujo de paletas a una señal estándar de 4 a 20mA. Su ubicación es en campo, ya que se encuentra adjunto al sensor. La salida de este dispositivo se encuentra conectada en una de las entradas analógicas del controlador.

Controlador de Flujo (FC) Controlador lógico programable Siemens S7-1200, el mismo que se encuentra conectado con un módulo de entradas y salidas, las cuales se encuentran configuradas en la programación del autómatas, donde recoge las señales de presión y caudal de los transmisores. Contiene dos bloques PID, que, según la necesidad del sistema realizan en control automático de la variable caudal ya sea por estrangulamiento o por variador de frecuencia, el mismo se comunica con una touch panel para realizar el control automático; y a su vez mediante servidor OPC, obtiene las curvas características de la bomba. Este dispositivo se encuentra en el panel frontal del sistema.

Controlador Indicador de Velocidad (SIC) Variador de frecuencia Sinamics G110, cuya ubicación no es accesible al operador, ya que se encuentra en la parte interna del bloque de panel de control, este variador, controla la velocidad de la bomba ya sea manualmente o a su vez mediante una señal de 0 a 10V enviada desde el controlador.

Conversor Corriente a Presión (FY) Conversor corriente a presión FISHER, se encarga de transformar la señal eléctrica proveniente del controlador a una señal neumática para el control del actuador de la válvula; tiene la función de indicador, ya que contiene un manómetro que indica la presión de salida que va desde 3 a 15 psi, el mismo que se encuentra ubicado en la parte superior del panel frontal.

Válvula de Control (CV) Válvula Badger Meter, cumple la función de estrangulamiento, requiere de una señal de instrumentación proveída por el conversor corriente a presión, así como una señal de alimentación para su correcto funcionamiento. Como muestra el diagrama, la válvula de control tiene una conexión bridada.

Registrador de Flujo (FR) Contiene control y visualización compartida en el panel frontal, corresponde al Touch Panel, cuya función es visualizar las magnitudes de las variables, así como realizar el control por estrangulamiento o por variador de frecuencia. Se encuentra conectado al controlador por medio de ethernet.

Registrador Indicador de Flujo y Presión Correspondiente al computador accesible al operador, cuya conexión con el controlador se realiza mediante OPC, cuya funcionalidad se centra en obtener las curvas características de la bomba para su análisis.

3.6. Diagrama de flujo del sistema

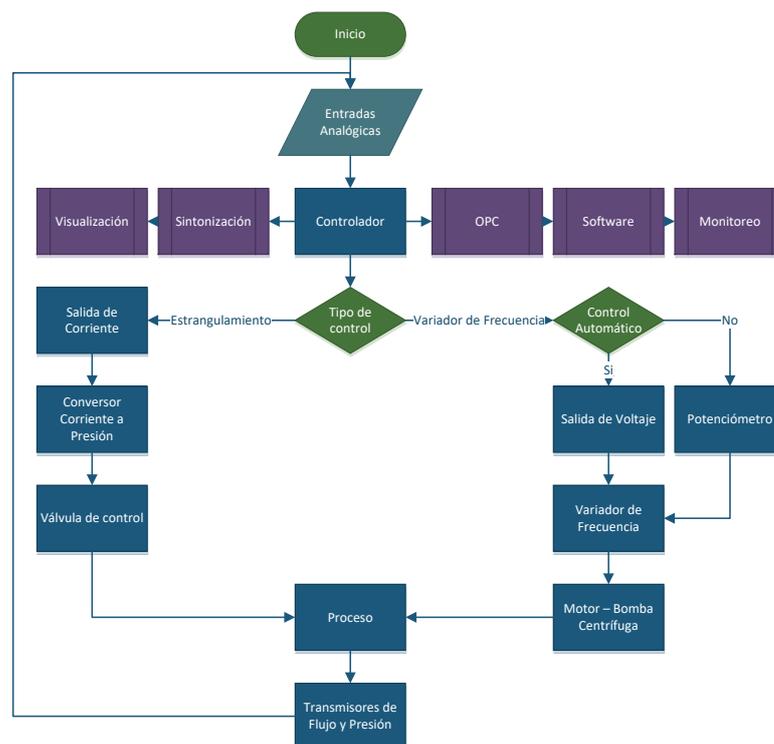


Figura 27 Diagrama de flujo del sistema

El diagrama de flujo representado en la Figura 27, indica el esquema de operación del sistema, donde: el controlador realiza la lectura de las entradas analógicas por parte del módulo correspondiente, el mismo que para obtener las curvas características debe ser sintonizado en cada tipo de control disponible para el objetivo deseado.

Si el operador desea efectuar el control por estrangulamiento, el controlador maneja la salida de corriente, la misma que actúa sobre el convertidor corriente a presión, el mismo que interviene en el actuador de la válvula para variar el desplazamiento del obturador de la válvula de control, y de esa manera controlar el caudal del sistema.

En el caso de que el operador requiera realizar el control por variador de frecuencia, puede realizar el control manual del caudal por medio del uso del potenciómetro; o a su vez, puede controlar el caudal por medio del controlador, que envía una señal de voltaje hacia el variador de frecuencia, cuya incidencia altera la velocidad del motor y de la bomba centrífuga en función del voltaje, así como de la frecuencia. El sistema se encuentra realimentado por la lectura de las variables físicas de flujo y presión por medio de los respectivos transmisores.

El sistema puede ser sintonizado y monitoreado por medio del Touch Panel instalado en el panel frontal, donde se puede visualizar el estado de las variables, así como realizar el control de caudal mediante los métodos mencionados. El controlador se comunica con el software LabVIEW a través del OPC para el monitoreo de las variables, el control de flujo y la obtención de las curvas características de la bomba.

3.7. Programación de los equipos e instrumentos que conforman el sistema

3.7.1. Programación del variador de frecuencia

El variador de frecuencia se encuentra en base a los parámetros que vienen detallados en la placa del motor que acciona la bomba centrífuga como se indica en la Figura 28, estos datos son ingresados al variador mediante el Panel BOP para posteriormente ponerlo en servicio.

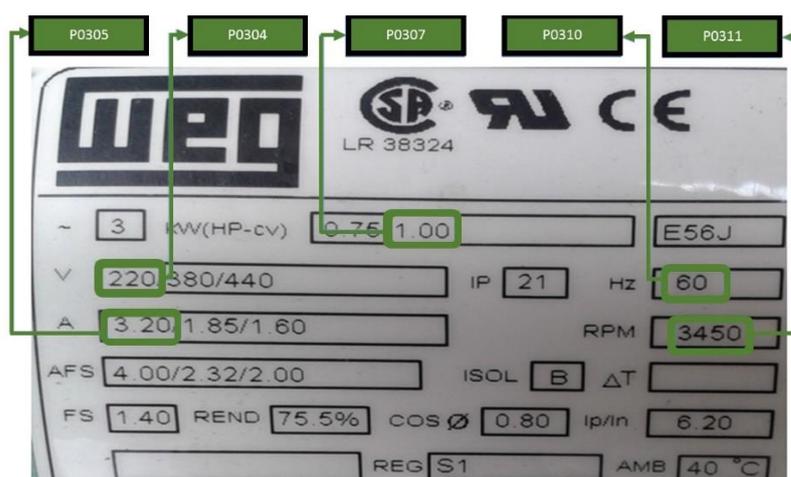


Figura 28 Características del motor

La Tabla 1, muestra los parámetros ingresados para la configuración del variador de frecuencia, para su correcto funcionamiento.

Tabla 1

Parámetros ingresados al variador de frecuencia

Parámetro	Detalles	Valor
P0010	Iniciar puesta en servicio rápida.	1
P0100	Funcionamiento para 1 hp / 60 Hz.	1
P0304	Tensión nominal del motor.	220
P0305	Corriente nominal del motor.	3.20
P0307	Potencia nominal del motor.	1.00

Continúa



P0310	Frecuencia nominal del motor.	60.00
P0311	Velocidad nominal del motor (rpm).	340
P0700	Selección de la fuente de órdenes	2
P1000	Selección de la fuente de órdenes	2
P1080	Frecuencia mínima del motor.	0
P1082	Frecuencia máxima del motor.	60.00
P3900	Fin puesta en servicio rápida.	0
P0010	Iniciar puesta en servicio rápida.	0

a. Configuración del variador de frecuencia

Pulsar el botón P para establecer los valores para cada parámetro de configuración como se detalla a continuación:

- Desplazarse a P0010, pulsar P para ingresar al valor del parámetro y cambiarlo a 1, para configurar los parámetros de puesta en servicio rápida, pulsar P para guardar el cambio.
- Desplazarse a P0100, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 1, para concordar con el parámetro del DIP a 1hp y 60 Hz, pulsar P para guardar el cambio.
- Desplazarse a P0304, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 220 como lo indica la placa del motor, pulsar P para guardar el cambio.
- Desplazarse a P0305, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 3.20 como lo indica la placa del motor, pulsar P para guardar el cambio.
- Desplazarse a P0307, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 1 como lo indica la placa del motor, pulsar P para guardar el cambio.
- Desplazarse a P0310, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 60 como lo indica la placa del motor, pulsar P para guardar el cambio.

- Desplazarse a P0311, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 3450 como lo indica la placa del motor, pulsar P para guardar el cambio.
- Desplazarse a P0700, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 2 de tal manera que la selección de la fuente de órdenes sea externa, pulsar P para guardar el cambio.
- Desplazarse a P1000, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 2 de tal manera que la velocidad del variador de frecuencia sea cambiada desde una entrada analógica, pulsar P para guardar el cambio.
- Desplazarse a P1080, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 0 de tal manera que la frecuencia mínima de operación de la bomba sea 0 Hz, pulsar P para guardar el cambio.
- Desplazarse a P1082, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 60 de tal manera que la frecuencia máxima de operación de la bomba sea 60 Hz, pulsar P para guardar el cambio.
- Desplazarse a P3900, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 0 para finalizar la puesta de servicio rápida, pulsar P para guardar el cambio.
- Desplazarse a P0010, pulsar P y cambiar el valor de este parámetro a 1 para poder cargar los cambios y que el motor pueda entrar a funcionamiento, pulsar P para guardar el cambio.

3.7.2. Ajuste de Convertidor Corriente a Presión

El convertidor de corriente a presión transforma la señal de 4 a 20 mA que proviene del PLC a una señal neumática de 3 a 15 psi, por lo cual el conversor debe estar correctamente calibrado para que el posicionador de la válvula tenga un desplazamiento del rango adecuado para el control de caudal.

Se debe usar el siguiente procedimiento de calibración para un rango de salida de 3 a 15 psi para una señal de entrada de 4 a 20 mA:

1. Conectar el suministro de aire al puerto de suministro de aire.
2. Conecte un indicador de salida de precisión al puerto de señal de salida.
3. Asegúrese de que el puerto del medidor de salida tenga un indicador de salida o un tapón roscado instalado.
4. Retire la cubierta del compartimento de terminales.
5. Conecte el conductor positivo (+) de la fuente de corriente (o fuente de tensión) al bloque positivo (+) y la corriente (Cable de resistencia de 250 ohmios) cable negativo (-) al borne negativo (-).
6. Aplique una entrada de 4,0 mA ($V_m = 1,0$ V) y ajuste el tornillo cero para obtener una salida de 0,2 bar (3,0 psi).
7. Aplique una entrada de 12,0 mA ($V_m = 3,0$ V) y ajuste el tornillo de span para lograr una salida de 1,0 bar (15,0 psi).
8. Repita los pasos 6 y 7 para verificar y completar la calibración.

3.7.3. Ajuste del transmisor de flujo

El transmisor de flujo Georg Fischer Signet 8550-1 debe ser ajustado para un rendimiento óptimo, se requiere modificar los parámetros de calibración y opciones que posee el mismo.

a. Modificar la calibración del transmisor de flujo

Pulsar la tecla ENTER por 2 segundos para ingresar al menú de calibración como se muestra en la Figura 29.

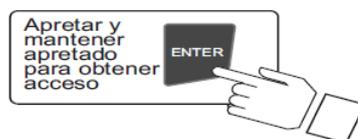


Figura 29 Acceso al menú de calibración

Fuente: (Fischer G. , Signet 8550, 2016)

Ingresar el código secuencial de teclas, tres flechas arriba y una abajo, como se muestra en la Figura 30.

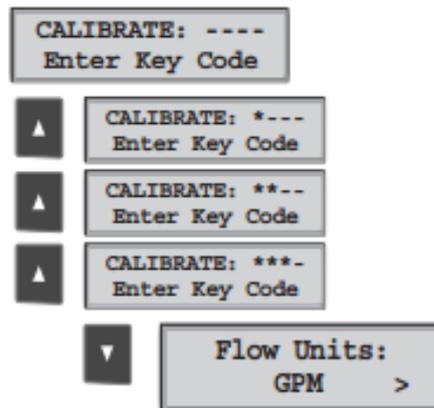


Figura 30 Código de ingreso al menú de calibración

Fuente: (Fischer G. , Signet 8550, 2016)

Pulsar la flecha abajo y desplazarse a Flow K-Factor, pulsar la tecla derecha para ingresar al componente y cambiar el valor con las flechas de arriba/abajo a 202.61 que es exclusivo para el sensor y al catálogo de la tubería, el banco de pruebas tiene una tubería de 3/4 HG, pulsar ENTER para guardar los cambios.

Pulsar la flecha abajo y desplazarse a Total K-Factor, pulsar la tecla derecha para ingresar al componente y cambiar el valor con las flechas de arriba/abajo a 202.61, este parámetro es el mismo del Flow K-Factor, pulsar ENTER para guardar los cambios.

Pulsar la flecha abajo y desplazarse a Loop Range: GPM, pulsar la tecla derecha para ingresar al componente y seleccionar con las flechas de arriba/abajo el valor mínimo de 0 y el valor máximo de 22; éste dato se obtiene en el momento en que el flujo que circula por la tubería del banco de pruebas está funcionando a máxima frecuencia, pulsar ENTER para guardar los cambios.

Pulsar a la vez las flechas de arriba y abajo como se indica en la Figura 31, para salir del menú de calibración y regresar a la puesta en servicio normal.



Figura 31 Salir del menú de calibración

Fuente: (Fischer G. , Signet 8550, 2016)

b. Modificar las opciones del transmisor de flujo

Pulsar la tecla ENTER por 5 segundos para ingresar al menú de opciones como se muestra en la Figura 32.

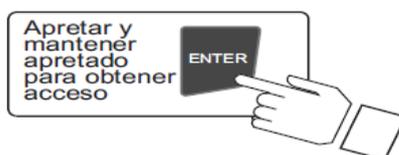


Figura 32 Acceso al menú de opciones

Fuente: (Fischer G. , Signet 8550, 2016)

Ingresar el código secuencial de teclas, tres flechas arriba y una abajo como se muestra en la Figura 33.

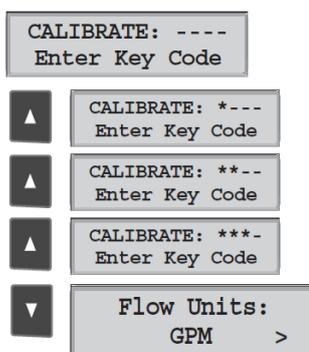


Figura 33 Código de ingreso al menú de opciones

Fuente: (Fischer G. , Signet 8550, 2016)

Pulsar la flecha abajo y desplazarse a Averaging, pulsar la tecla derecha para ingresar al componente y cambiar el valor con las flechas de arriba/abajo a 8 segundos para el promediado de la señal, pulsar ENTER para guardar los cambios.

Pulsar la flecha abajo y desplazarse a Sensitivity, pulsar la tecla derecha para ingresar al componente y cambiar el valor con las flechas de arriba/abajo a 5 para colocar la sensibilidad a la mitad del rango, pulsar ENTER para guardar los cambios, este parámetro trabaja en conjunto con el promediado de la señal para estabilizar los cambios fuertes de caudal.

Pulsar a la vez las flechas de arriba y abajo como se indica en la Figura 34, para salir del menú de calibración y regresar a la operación normal.



Figura 34 Salir del menú de opciones

Fuente: (Fischer G. , Signet 8550, 2016)

3.7.4. Ajuste de los transmisores de presión

El transmisor de presión Georg Fischer Signet 8450-1, debe ser ajustado para un rendimiento óptimo, se requiere modificar los parámetros de calibración y opciones que tiene el mismo.

a. Modificar la calibración del transmisor de presión

Pulsar la tecla ENTER por 2 segundos para ingresar al menú de calibración como se muestra en la Figura 35.



Figura 35 Acceso al menú de calibración

Fuente: (Fischer G. , Signet 8450, 2016)

Ingresa el código secuencial de teclas, tres flechas arriba y una abajo como se muestra en la Figura 36.

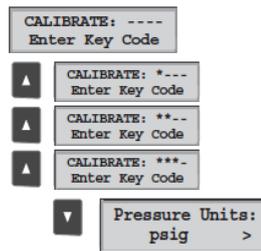


Figura 36 Código de ingreso al menú de calibración

Fuente: (Fischer G. , Signet 8450, 2016)

Pulsar la flecha abajo y desplazarse a Pressure Units, pulsar la tecla derecha para ingresar al componente y seleccionar kPa con las flechas de arriba/abajo, pulsar ENTER para guardar los cambios.

Pulsar la flecha abajo y desplazarse a Loop Range: kPa, pulsar la tecla derecha para ingresar al componente y cambiar con las flechas de arriba/abajo el valor mínimo de -23 y el valor máximo de 284 para el transmisor de presión 1 y valor mínimo de 16 y el valor máximo de -60 para el transmisor de presión 2, pulsar ENTER para guardar los cambios, los valores máximos se los obtiene mientras el banco de pruebas trabaja con la frecuencia máxima y la válvula V-5 se encuentra cerrada.

Pulsa a la vez las flechas de arriba y abajo como se indica en la Figura 37, para salir del menú de calibración y regresar a la operación normal.



Figura 37 Salir del menú de calibración

Fuente: (Fischer G. , Signet 8450, 2016)

b. Modificar las opciones del transmisor de presión

Pulsar la tecla ENTER por 5 segundos para ingresar al menú de opciones como se muestra en la Figura 38.



Figura 38 Acceso al menú de opciones

Fuente: (Fischer G. , Signet 8450, 2016)

Ingresa el código secuencial de teclas, tres flechas arriba y una abajo como se muestra en la Figura 39.

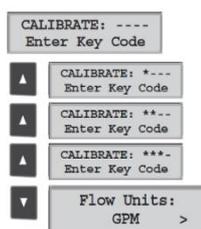


Figura 39 Código de ingreso al menú de opciones

Fuente: (Fischer G. , Signet 8450, 2016)

Pulsar la flecha abajo y desplazarse a Averaging, pulsar la tecla derecha para ingresar al componente y cambiar el valor con las flechas de arriba/abajo a LOW a los dos transmisores para que los cambios de presión no sean fuertes, pulsar ENTER para guardar los cambios.

Pulsa a la vez las flechas de arriba y abajo como se indica en la Figura 40, para salir del menú de calibración y regresar a la operación normal.



Figura 40 Salir del menú de opciones

Fuente: (Fischer G. , Signet 8450, 2016)

3.7.5. Configuración y programación del PLC y TOUCH PANEL

Mediante el software TIA Portal (Totally Integrated Automation) se realiza la configuración y programación necesaria del PLC S7-1200 para el buen funcionamiento del proceso, además de crear el HMI de la TOUCH PANEL KTP 600; herramientas muy importantes en ingeniería.

a. Configuración del PLC S7-1200

El software TIA Portal posee las configuraciones necesarias, bloques de programación y dispositivos asociados al proceso, de una forma intuitiva y flexible, en la Figura 41, se detalla la configuración necesaria del PLC S7-1200.

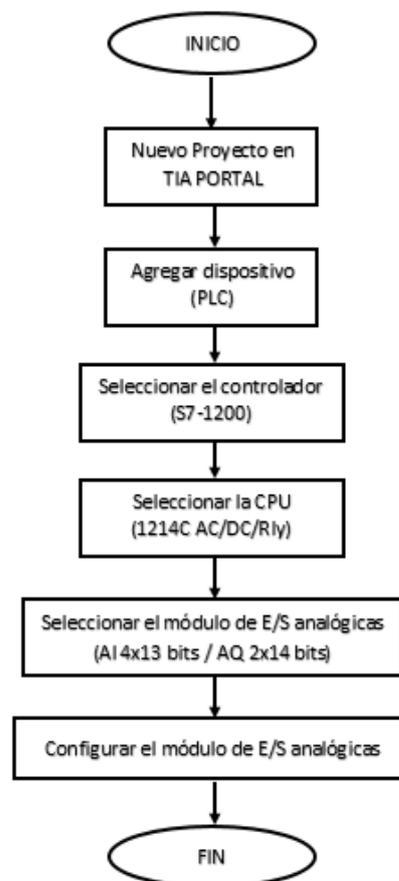


Figura 41 Esquema de configuración PLC S7-1200

En la Figura 42 sección (a) se establece un nuevo proyecto con su respectivo nombre y la dirección en la que desea guardarlo, en la sección (b) se configura un nuevo dispositivo, en sección (c) se selecciona el tipo de controlador que se va a utilizar en este caso el PLC S7-1200 y la CPU 1214C AC/DC/Rly y en la sección (d) se selecciona el módulo de entradas y salidas analógicas, el cual se encuentra conectado externamente a la CPU del PLC, en este caso es el módulo AI 4x13 bits / AQ 2x14 bits

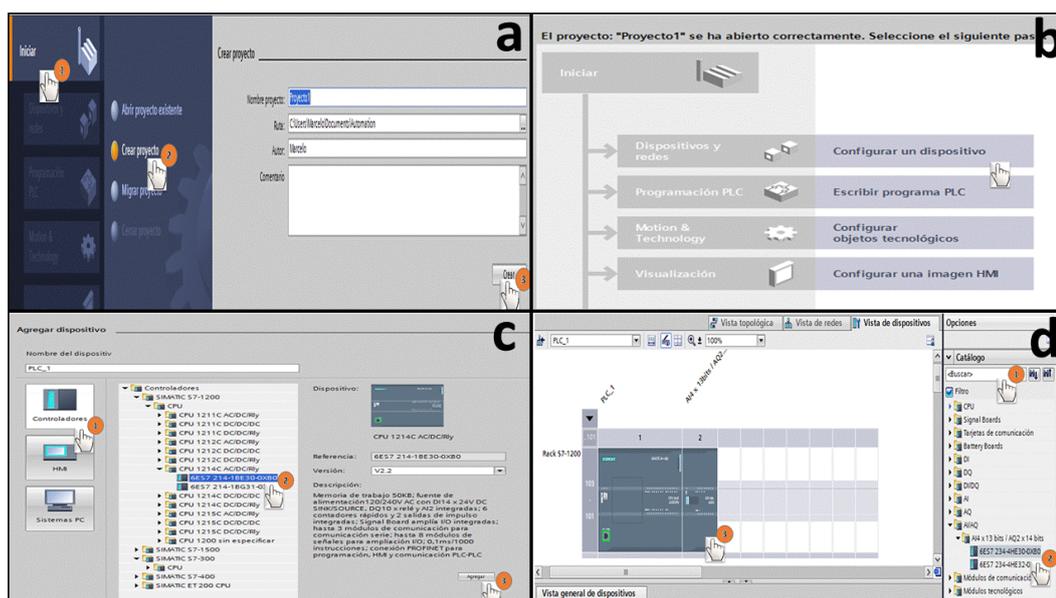


Figura 42 Pantallas de configuración inicial del PLC S7-1200

Para configurar el módulo de entradas y salidas y analógicas se da click derecho en el módulo que se encuentra en la vista de dispositivos, aquí se configuran las tres entradas analógicas con el tipo de medición (corriente) para la adquisición y monitoreo de datos de los dos transmisores de presión y el transmisor de caudal; de la misma manera se configura las salidas analógicas, el canal 0 se configura con intensidad para dar una señal de 4 a 20 mA al convertor I/P, el mismo que a su salida dará una señal de 3 a 15 psi para el control de la válvula proporcional como se muestra en la Figura 43 sección (a); seguido del canal 1, el cual se configura con el tipo de salida analógica de tensión de 0 a 10 V para el control del variador de frecuencia, el mismo que controlara la velocidad de operación de la bomba centrífuga como indica la sección (b).

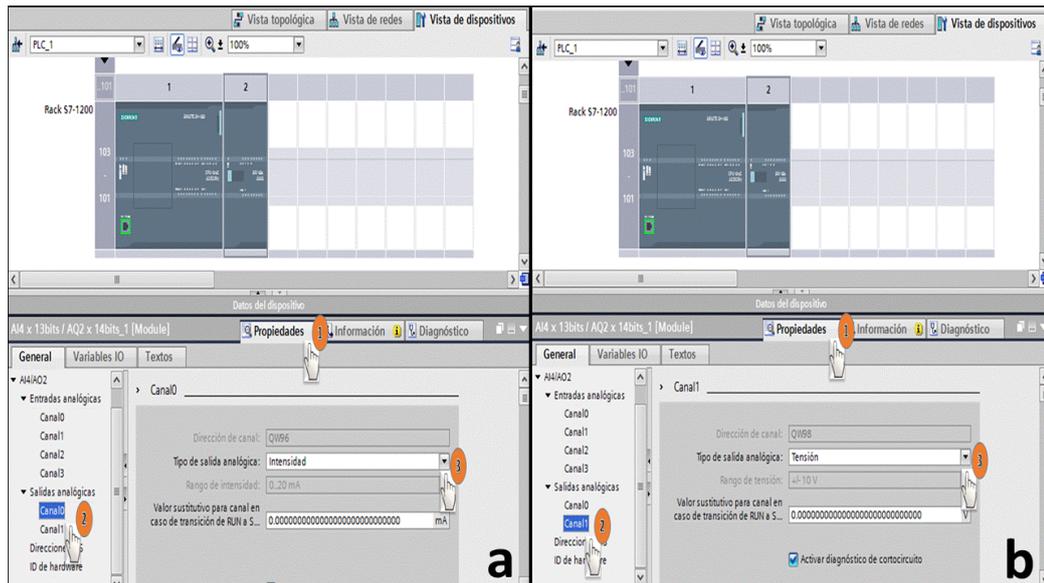


Figura 43 Pantallas de configuración del módulo de E/S analógicas

b. Programación del PLC S7-1200

La programación del PLC se centra en el acondicionamiento de las variables de presión, caudal, PID para de esta manera poder obtener control sobre la variable del proceso, estos tag's además van a ser empleados en el HMI y en OPC para poder tener comunicación con el software Labview el cual se encarga de generar las curvas características, objetivo principal en el que se centra este trabajo de investigación.

b.1. Asignación de variables del programa

Para tener un control eficiente del PLC es necesario asignar las variables en forma correcta, teniendo en cuenta la dirección de entrada o salida que se le asignó a cada variable, en el árbol del proyecto en la opción "mostrar todas las variables", podemos visualizar y crear las variables que sean necesarias para el proceso, Figura 44.

Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Visibl...	Acces...	Comentario
1 Caudal	Tabla de variables	%I96					
2 Presion1	Tabla de variables	%I98					
3 Presion2	Tabla de variables	%I102					
4 CaudalR	Tabla de variables	%I16					
5 encender	Tabla de variables e.	%I18					
6 Comente	Tabla de variables e.	%Q96					
7 Voltaje	Tabla de variables e.	%Q98					
8 Caudal_N	Tabla de variables e.	%MD4					
9 Caudal_R	Tabla de variables e.	%MD8					
10 Presion1_N	Tabla de variables e.	%MD12					
11 Presion1_R	Tabla de variables e.	%MD16					
12 Presion2_N	Tabla de variables e.	%MD20					
13 Presion2_R	Tabla de variables e.	%MD24					
14 Presion2_Rbn	Tabla de variables e.	%MD28					
15 Set_Point_R	Tabla de variables e.	%MD32					
16 Set_Point_N	Tabla de variables e.	%MD36					
17 Set_PointM	Tabla de variables e.	%MD40					
18 CV_N	Tabla de variables e.	%MD44					
19 CV_R	Tabla de variables e.	%MD48					
20 Kp_Valvula	Tabla de variables e.	%MD52					
21 Kv_Valvula	Tabla de variables e.	%MD56					
22 Kv_Valvula	Tabla de variables e.	%MD60					
23 PID_Valvula	Tabla de variables e.	%MD0					
24 PID_Vanador	Tabla de variables e.	%MD1					

Figura 44 Crear y asignar variables del programa

b.2. Escalamiento de variables Bloque Main

Para realizar el escalamiento de variables se debe tomar en cuenta que la resolución del módulo de entradas y salidas analógicas es de 0 a 27648 bits, a esto se suma que los transmisores industriales de presión y caudal que se encuentran instalados en el proceso entregan una señal de 4 a 20 mA, por lo tanto, el valor mínimo que se encontrara en la resolución para los escalamientos será de 5529, valor que se visualiza al activar la observación en el bloque de programas en modo “establecer conexión online”.

En el bloque de programas Main se utiliza bloques de NORM_X el cual normaliza el valor de una variable “value” en una escala lineal dando como resultado un numero flotante a la salida “out”, SCALE_X el cual escala el valor de la entrada “value” dando como resultado un numero entero a la salida “out”, obteniendo así las variables acondicionadas a los limites en los que se encuentra el proceso, Figura 45.

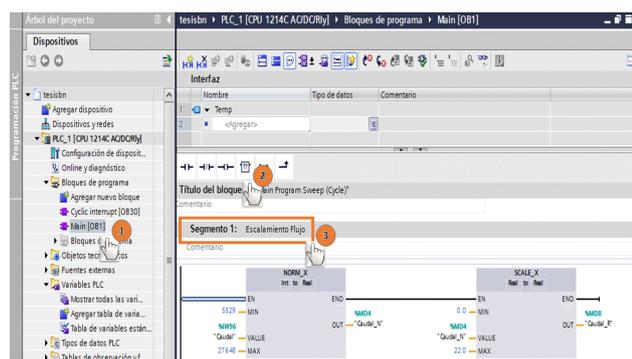


Figura 45 Escalamiento de la variable caudal

b.3. Configuración PID Bloque Cyclic interrupt

El control PID consta de la parte proporcional, integral y derivativa, el cual continuamente toma datos de la variable del proceso y lo compara con un valor deseado, en este caso se crearon dos objetos tecnológicos PID, uno para realizar el control por variador de frecuencia y el otro para el control mediante la válvula de control (estrangulamiento). Los pasos para configurar un bloque tecnológico PID se detalla a continuación:

1. Como primer paso se debe agregar el objeto PID_Compact para el control por estrangulamiento, Figura 46.

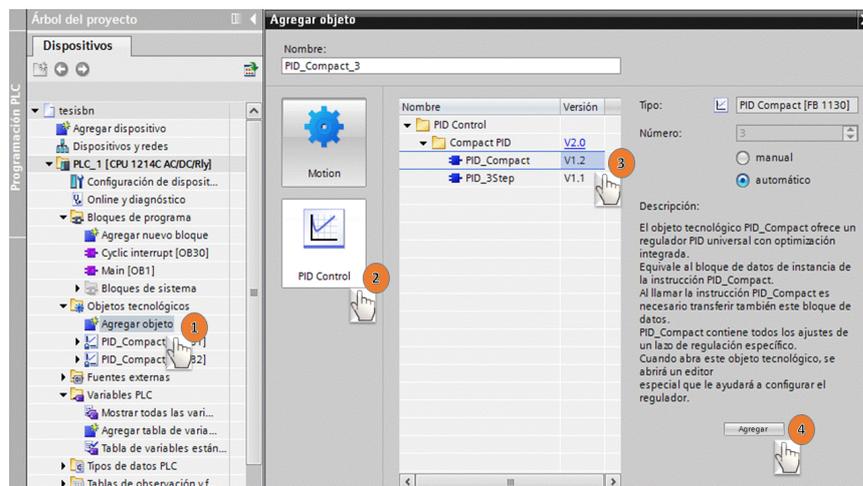


Figura 46 Crear objeto tecnológico PID_Compact

2. Se procede a configurar el objeto tecnológico PID creado en el cual se cambian los parámetros Input_PER y Output_PER, para que la entrada de la variable caudal del proceso acondicionada sea de 0 a 27648 y la salida tenga un valor de 0 a 27648 que es un equivalente de 0 a 20 mA que será enviado al convertor I/P para realizar las acciones del control de la variable caudal, Figura 47.

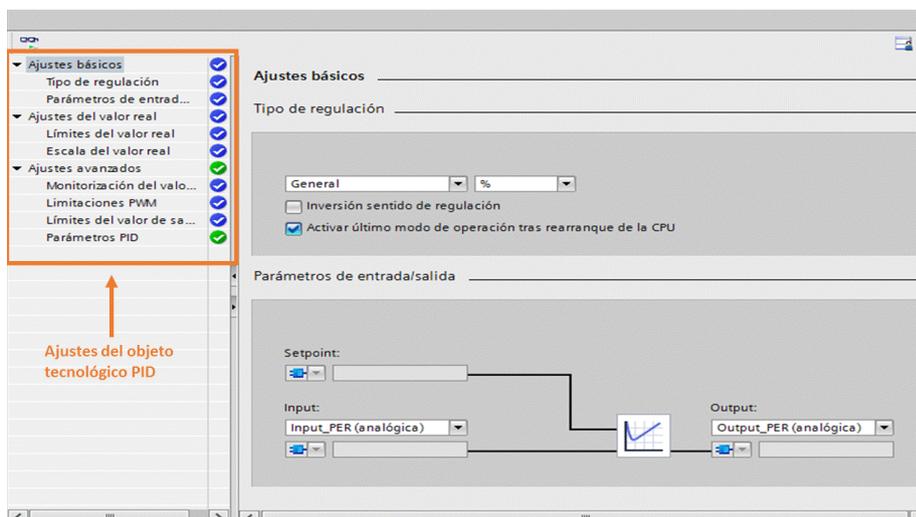


Figura 47 Configurar objeto tecnológico PID

- De esta manera se tiene como resultado el bloque de programa del objeto tecnológico PID para el control por estrangulamiento, Figura 48.

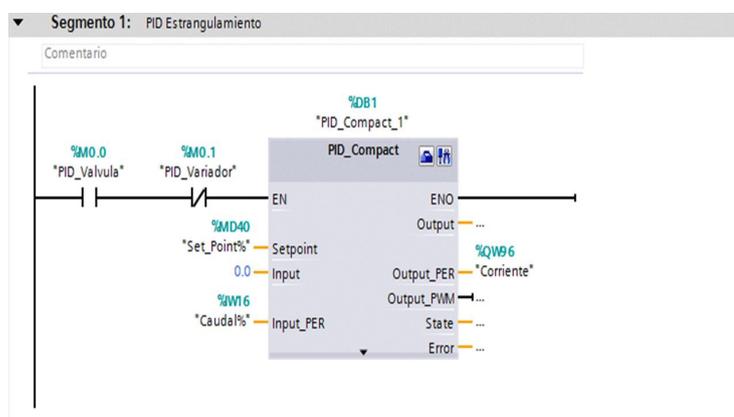


Figura 48 PID para el control del caudal por estrangulamiento

Los demás bloques de programas que fueron necesarios para el correcto funcionamiento del proceso se encuentran en el Anexo B (Programación en TIA Portal).

c. Configuración TOUCH PANEL KTP 600

Este dispositivo al ser programado permite la visualización de la interfaz la cual debe ser intuitiva y amigable con el usuario. El HMI que se desarrolla permite al usuario el monitoreo del proceso además de poder realizar el

control de la variable caudal mediante el método de estrangulamiento y por variador de frecuencia, además de ingresar parámetros PID, en la Figura 49 se detalla la configuración para el correcto funcionamiento de la TOUCH PANEL KTP 600.

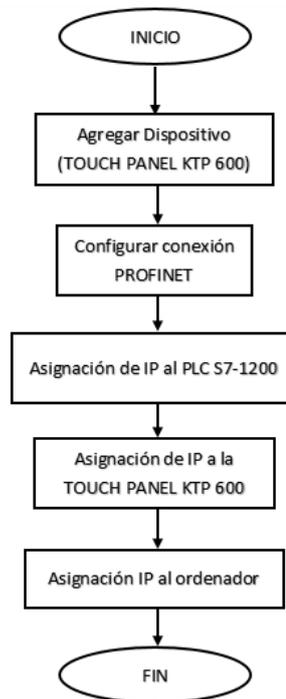


Figura 49 Esquema de configuración TOUCH PANEL KTP 600

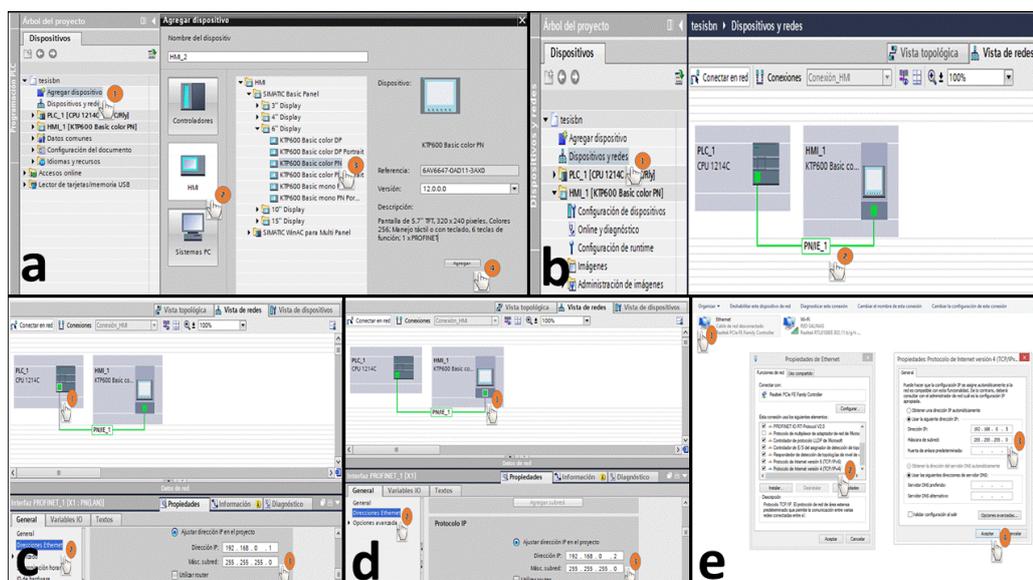


Figura 50 Pantallas de configuración TOUCH PANEL KTP 600

En la Figura 50 sección (a) se agrega el dispositivo TOUCH Panel KTP600, se desplaza al árbol del proyecto y en la opción “agregar dispositivos”, se elige el icono HMI y en las opciones que se despliegan seleccionamos el KTP 600 Basic color PN, en el árbol del proyecto en la opción “dispositivos y redes” configuramos la conexión PROFINET para que de esta manera el PLC pueda comunicarse con la TOUCH mediante un cable ethernet como indica la sección (b).

Para que no exista conflicto de comunicación entre el PLC y la TOUCH a cada dispositivo se le asigna una dirección ethernet especifica en la cual cada uno tendrá una dirección IP diferente, para el PLC la dirección que se le asigna es la 192.168.0.1 como se muestra en la sección (c), de la misma manera se le asigna una dirección IP a la TOUCH PANEL KTP 600 la cual será 192.168.0.2 como indica la sección (d), de igual manera para que no exista conflicto de comunicación con la PC y para poder cargar los programas realizados tanto del PLC como del HMI, se debe dar una dirección IP al computador para que se encuentre en la misma red del PLC y la TOUCH, los cuales estarán en conjunto mediante un switch, por tal razón se le asigna la dirección 192.168.0.5 con máscara de 255.255.255.255 a la PC como se muestra en la sección (e).

d. Programación TOUCH PANEL KTP 600

El HMI que se desarrolla es intuitivo y amigable para el usuario el cual contiene una pantalla principal con un menú para el monitoreo de las variables del proceso, así como para poder realizar el control de la variable caudal mediante el método de estrangulamiento y variador de frecuencia.

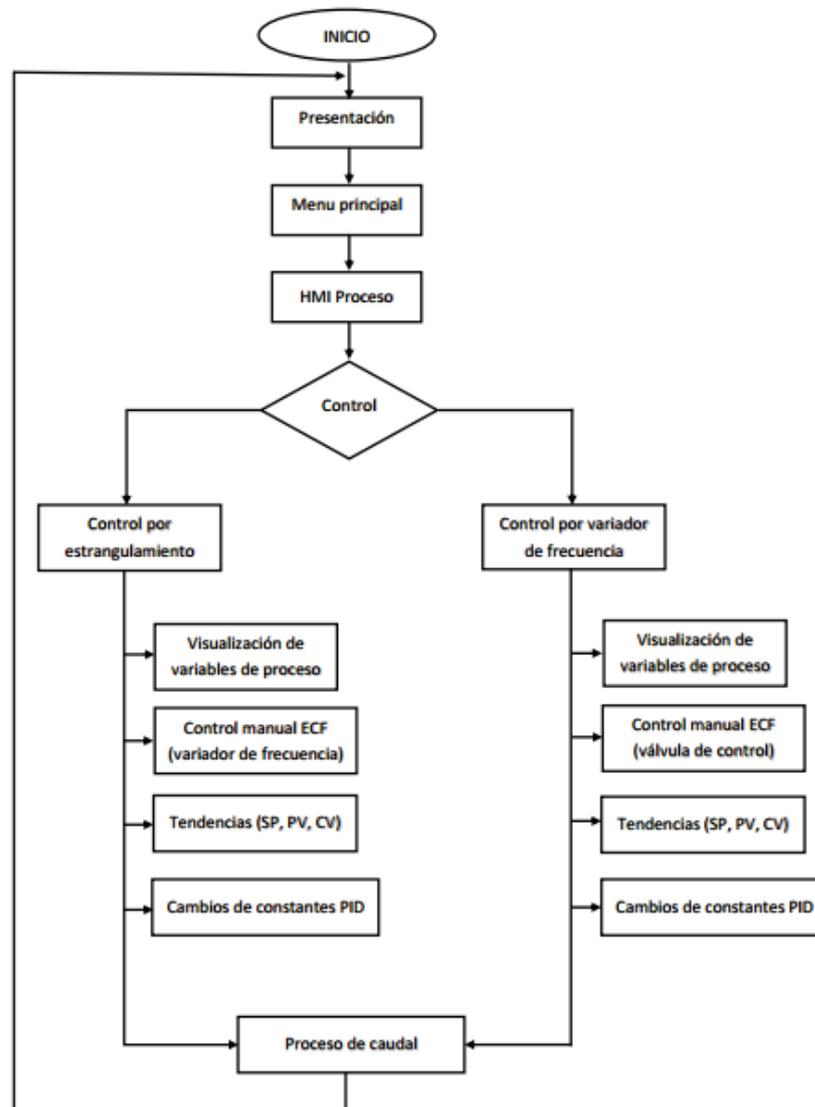


Figura 51 Programación TOUCH PANEL KTP 600

En la Figura 51 se detalla la programación de la TOUCH PANEL integrada en el proceso, el diagrama de flujo presenta las operaciones necesarias que se ejecutan para el correcto funcionamiento del proceso de caudal, en el HMI del proceso se puede seleccionar los métodos de control de caudal implementados (estrangulamiento, variador de frecuencia), en cada pantalla de los métodos de control de caudal se puede visualizar las variables del proceso, realizar un control manual de cada elemento de control final (válvula de control, variador de frecuencia), visualizar las tendencias (SP, PV, CV) y realizar cambios en las constantes del PID implementados para cada método, obteniendo así una facilidad de uso, control y monitoreo del proceso.

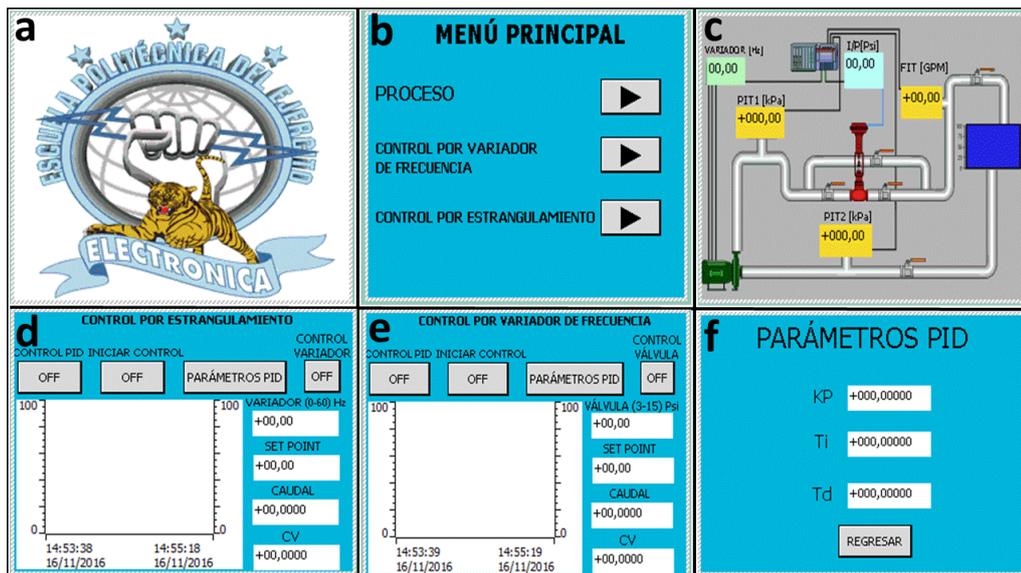


Figura 52 Pantallas HMI implementadas

En la Figura 52 se muestran las pantallas implementadas en el proceso, donde en la sección (a) se encuentra la pantalla de presentación, en la sección (b) se encuentra el menú principal del HMI, en la sección (c) se encuentra la pantalla del proceso, en la cual se pueden monitorear las variables de flujo, presión a la impulsión, presión a la succión y ver el valor que envía el PLC a los elementos de control final, la sección (d) muestra el método de control de caudal por estrangulamiento, la sección (e) muestra el método de control de caudal por variador de frecuencia y en la sección (f) se encuentra la pantalla en la cual se puede manipular los valores de los parámetros PID de cada método de control de caudal implementado en el proceso.

3.7.6. Configuración del OPC

El OPC (OLE for Process Control) es el que se encarga de la comunicación entre el PLC y el software LabView, de esta manera los datos se envían desde el PLC en tiempo real para el monitoreo y obtención de las curvas características en LabView.

a. Configuración del Canal

Los pasos para la configuración del canal se detallan en el diagrama de flujo de la Figura 53.

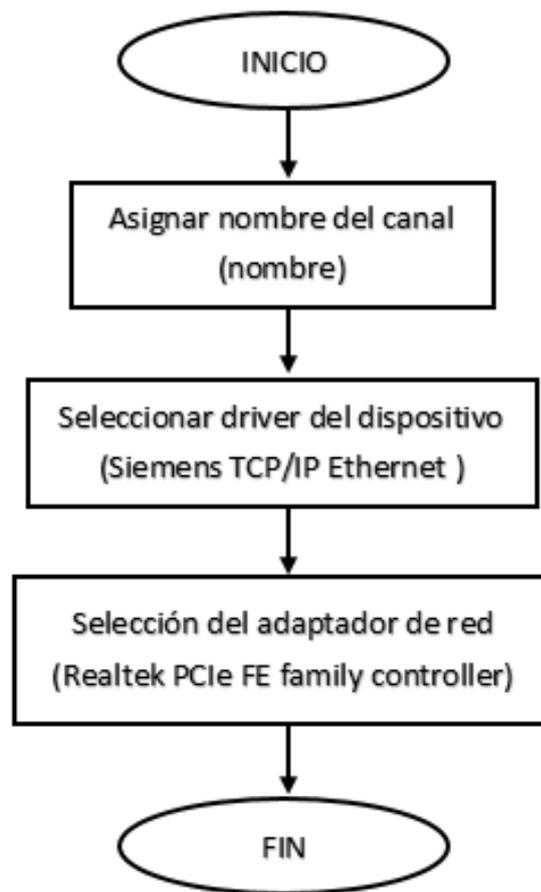


Figura 53 Configuración del canal

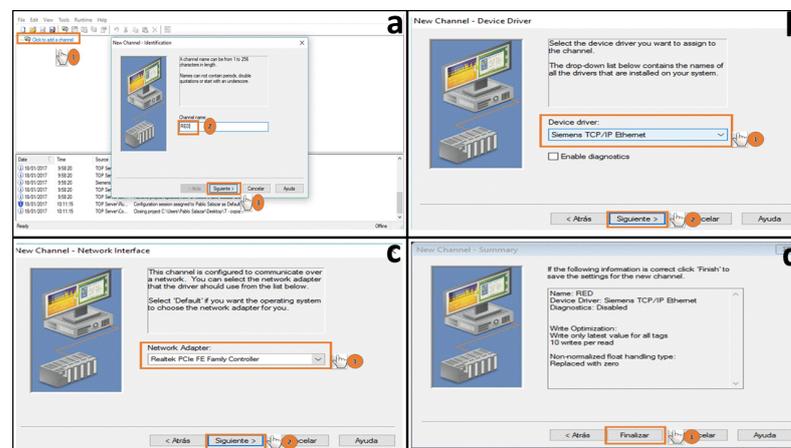


Figura 54 Pantallas de configuración del canal

En la Figura 54, sección (a) se crea un nuevo canal, en la sección (b) se selecciona “Siemens TCP/IP Ethernet” en la elección del driver del dispositivo, en la sección (c) se selecciona “Realtek PCIe Family Controller”, el mismo que

es el adaptador de red de la computadora y en la sección (d) se muestra la pantalla de finalización con un resumen de los parámetros configurados.

b. Configuración del dispositivo

Los pasos para la configuración del dispositivo se detallan en el diagrama de flujo de la Figura 55.

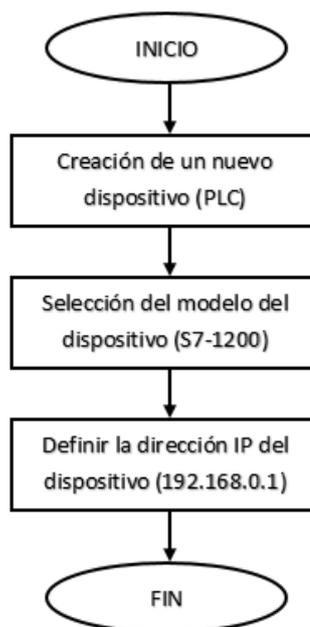


Figura 55 Configuración del dispositivo

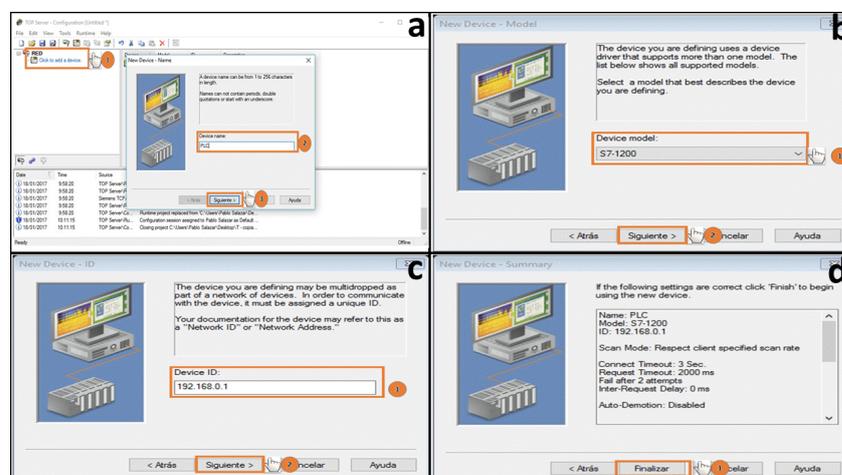


Figura 56 Pantallas de configuración del dispositivo

En la Figura 56, sección (a) se añade un nuevo dispositivo, en este caso como “PLC”, en la sección (b) se selecciona el dispositivo “S7-1200” como modelo de dispositivo, en la sección (c) se debe definir la dirección IP del dispositivo a ser configurado y en la sección (d) se muestra la pantalla de finalización con todos los parámetros configurados.

c. Creación de Tags

Los pasos para la creación de tags se detallan en el diagrama de flujo de la Figura 57.

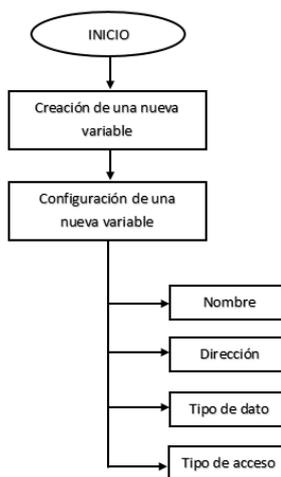


Figura 57 Creación de tags

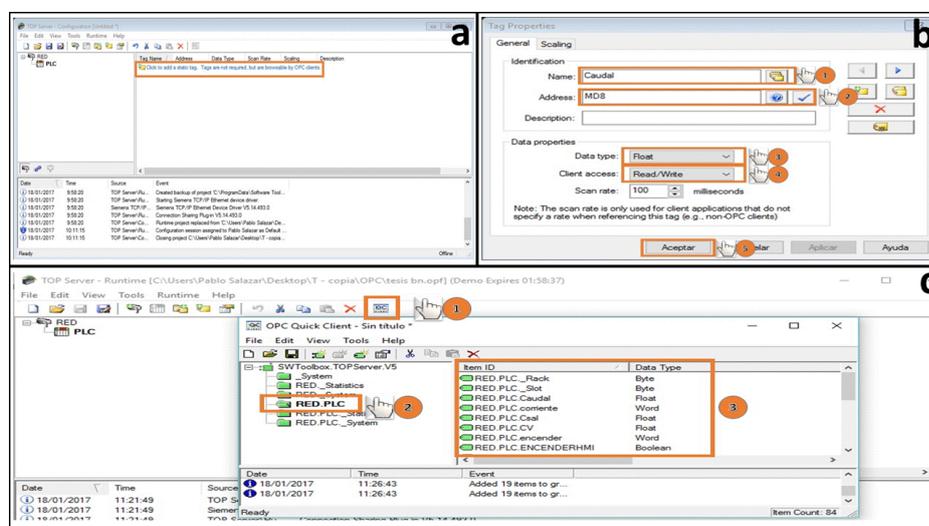


Figura 58 Pantallas de creación de tags

En la Figura 58, sección (a) se muestra la pantalla para crear un nuevo tag “Click to add a static tag”, en la sección (b) se muestra la pantalla para establecer el nombre de la tag; a continuación, se debe fijar la dirección de la variable que se encuentra establecida en el PLC; posteriormente, se selecciona el tipo de datos de la variable; inmediatamente, se debe seleccionar el tipo de acceso a la variable, en este caso es de lectura y escritura y en la sección (c) se muestra la pantalla de las variables que han sido creadas y enlazadas al PLC, se puede verificar el estado de las variables y los valores que las mismas presentan.

3.7.7. Programación del software LabView

a. Configuración inicial del software LabView

El software LabView es el encargado de generar las curvas características de los métodos de control de caudal tanto por variador de frecuencia como por estrangulamiento, además de realizar control del mismo. A continuación, se detalla un ejemplo de programación de como adquirir datos de las variables que proporciona el PLC:

1. Una vez abierto el software LabView se procede a crear un nuevo proyecto, en el cual se encontrará toda la programación necesaria para el funcionamiento óptimo del proceso, así como el de la obtención de las curvas características objetivo principal del proyecto de investigación, Figura 59.

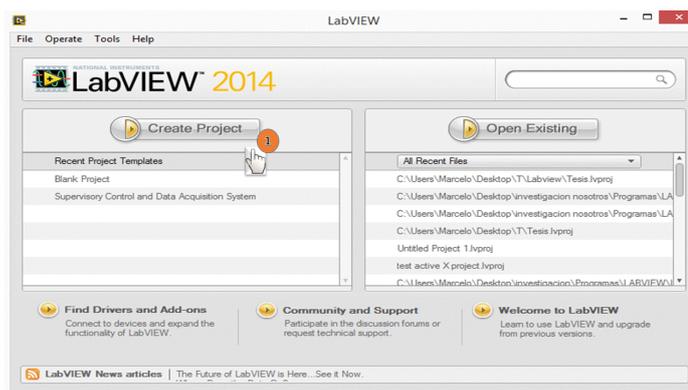


Figura 59 Crear un nuevo Proyecto

- Al crear un nuevo proyecto se despliegan las ventanas del panel frontal donde van todos los objetos que visualizará el usuario y el diagrama de bloques en donde irá la programación necesaria para los requerimientos del sistema, Figura 60.

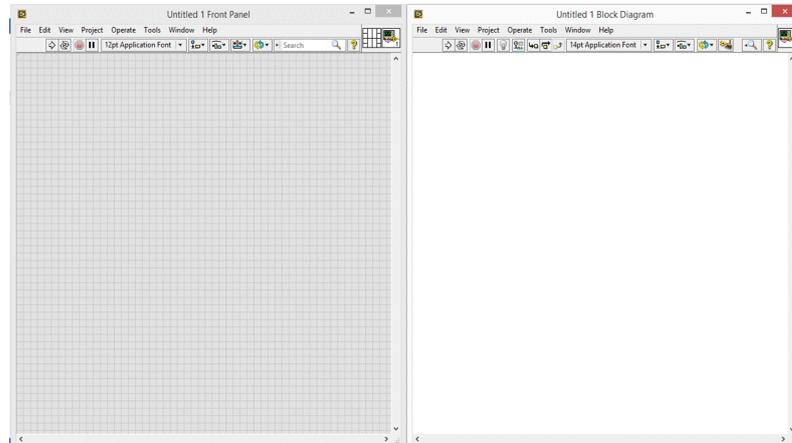


Figura 60 Diagrama de Bloques y Panel Frontal del Software LabView

- En el Panel Frontal se arrastra un indicador numérico en el cual se va a monitorear una variable a elección en este caso caudal, se da click derecho en el objeto y se selecciona las propiedades, aquí elegir la pestaña de Data Binding donde se tiene que elegir Data Socket, el tipo de acceso que es de lectura y en browse elegir DSTP SERVER para poder enlazar el tag con el indicador, dirigirse a Top Server y ahí dirigirse RED-PLC-Caudal y se colocará automáticamente la dirección a la que el indicador va a enlazarse, Figura 61.

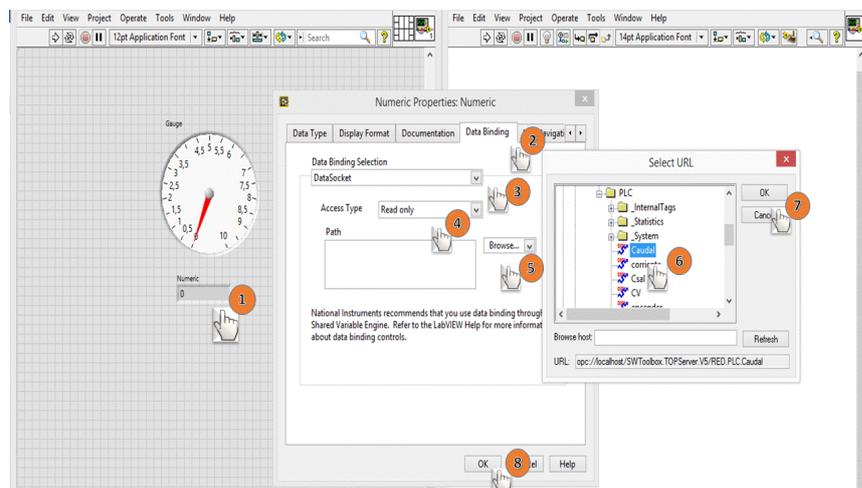


Figura 61 Asignación del tag al indicador

4. Como paso final en la ventana de diagrama de bloque se coloca un lazo while en los objetos creados para de esta manera tener una secuencia repetitiva y que siempre se estén mostrando los datos, Figura 62.

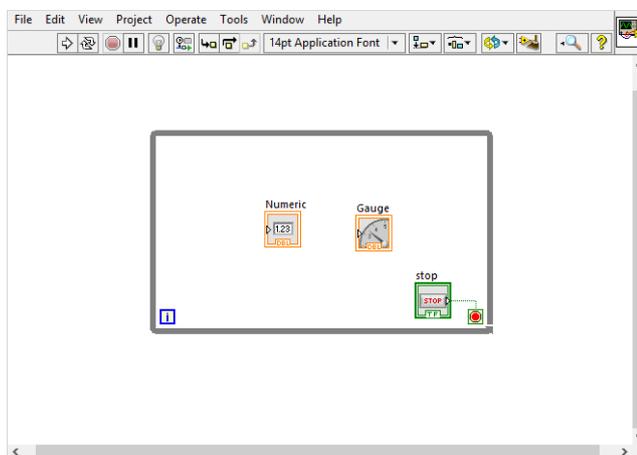


Figura 62 Programación diagrama de bloques

b. Programación para la obtención de datos de los controles de caudal implementados

La obtención de datos para la construcción de las curvas características de los métodos de control de caudal por estrangulamiento y por variador de frecuencia se los puede hacer tanto de forma manual como automática como se detalla a continuación:

b.1. Programación para la obtención de datos de forma manual

Los datos son tomados de forma manual al presionar en el botón “Datos” en la frecuencia o estrangulamiento de la válvula en la que se desee trabajar, como se muestra en la Figura 63, los datos se irán almacenando uno a la vez en vectores, los cuales serán graficados, representando así las curvas características requeridas.

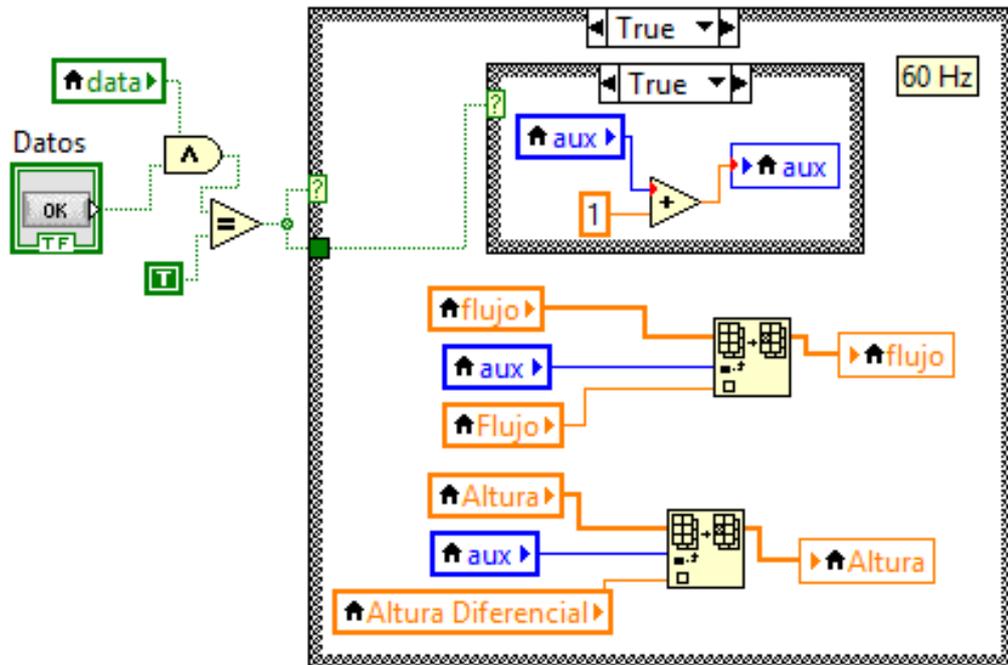


Figura 63 Obtención de datos manual

b.2. Obtención de datos de forma automática

Los datos son tomados de forma automática al presionar en el botón “Iniciar Datos Automático” como se muestra en la Figura 64, en la frecuencia o estrangulamiento de la válvula en la que se desee trabajar, los datos se irán almacenando uno a la vez en vectores, los cuales serán graficados, representando así las curvas características requeridas.



Figura 64 Obtención de datos automática

Para tomar los datos de forma automática, como se observa en la Figura 65, se realiza un cálculo del error, el mismo que se obtiene por la diferencia entre el set point y la variable de proceso, que en este caso es el caudal.

Con el error se realiza una comparación entre límites preestablecidos, los cuales han sido obtenidos mediante pruebas y ensayos para aseverar que el dato obtenido se encuentre acorde al esquema de obtención de datos; el error es cuantificado, de tal manera que, si el error se encuentra entre los límites de cada tipo de control, se ratifica que se ha alcanzado estabilidad en el control, y, por ende, el dato puede ser almacenado en el vector correspondiente.

Una vez que el dato ha sido almacenado, el set point cambia de valor, es decir se incrementa en una unidad, para realizar nuevamente el proceso descrito, y de esa manera se efectúan las iteraciones necesarias hasta que alcance el número de datos establecidos para cada vector.

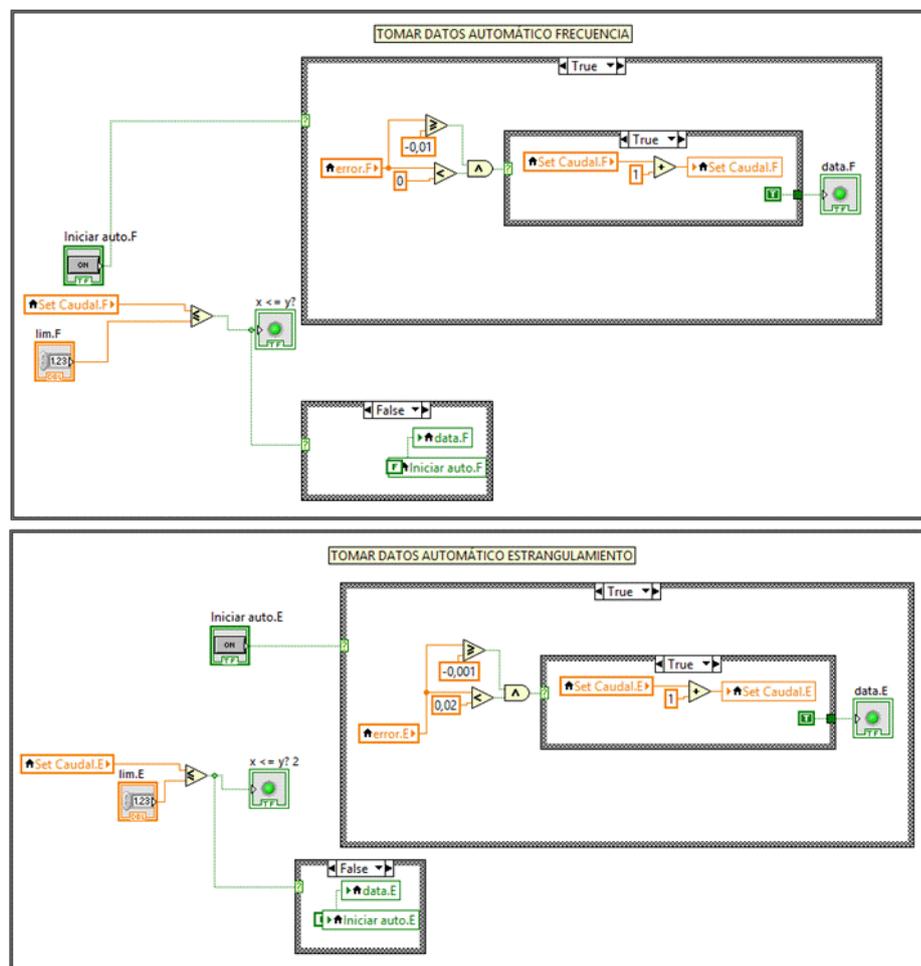


Figura 65 Programación para obtener los datos de forma automática

c. Curvas características del método de control de caudal por variador de frecuencia

c.1. Programación para la obtención de la curva característica de la bomba

En el sistema de entrenamiento implementado, se deben monitorear las presiones a la impulsión y a la succión de la bomba mediante los transmisores de presión Georg Fischer Signet 8450-1, además de proporcionar una regulación del flujo a la salida de la bomba y el medio necesario para la medición del flujo que suministra la bomba como lo es el transmisor de flujo Georg Fischer Signet 8550-1.

Para obtener la presión diferencial (altura total) se realiza una diferencia de presiones entre la impulsión y la succión como se indica en la ecuación 3.1.

$$H_m = \frac{P1 - P2}{\gamma} \quad (3.1)$$

Donde:

P1= Presión a la impulsión

P2= Presión a la succión

γ = Peso específico del agua 9800 N/m³

Para graficar la curva de la bomba se requiere ingresar los valores a cada nivel de caudal (vector izquierda) con su respectiva presión diferencial (altura total - vector derecha) como se indica en la Tabla 2, para poder almacenar los datos en diez vectores a frecuencias de 60, 50, 40, 30 y 20 Hz respectivamente para posteriormente graficar las curvas características como se indica en la Figura 66.

Tabla 2

Datos almacenados en vectores

FRECUECIA A 30 HZ	
0,00596772	3,28837
1,00954	3,16519
2,00515	3,15846
3,00375	3,26937
4,00235	3,2523
5,00194	3,22613
6,00154	3,16084
7,0061	3,14271
8,0057	3,1473
9,00032	3,05327
10,0069	3,0486
11,0005	2,94377
12,0021	2,84587
13,0007	2,73629
14,0042	2,67407

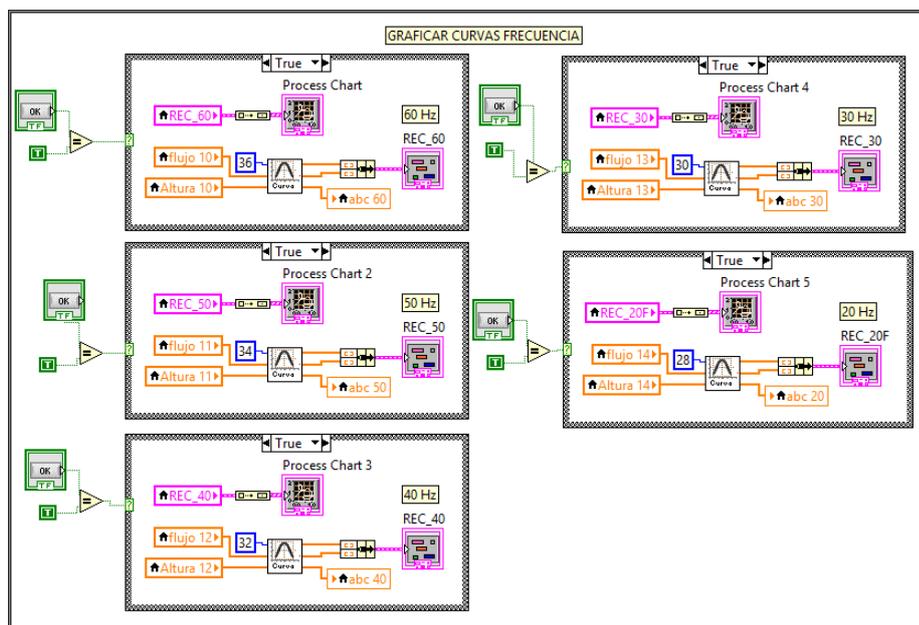


Figura 66 Programación curvas características de frecuencia

c.2. Programación para la construcción de la curva característica de la bomba

Para la construcción de la curva de la bomba a sus diferentes velocidades de operación se requieren todos los valores obtenidos de los vectores de flujo y presión diferencial (altura total) para cada valor de frecuencia, estos valores son enviados a un Sub VI con la programación como se indica en la Figura 67.

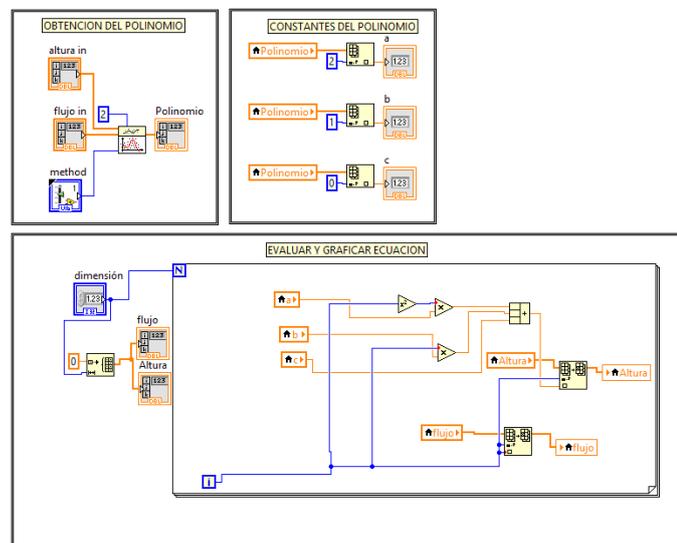


Figura 67 Construcción de las curvas características de la bomba

Dentro del Sub Vi, los valores de los vectores de flujo y de altura diferencial ingresan a una función denominada “General Polynomial Fit”, cuya salida devuelve el ajuste polinómico de orden polinomial para un conjunto de datos (X, Y), es decir los coeficientes de un polinomio acorde a los puntos ingresados en el mismo.

Para realizar el ajuste polinómico, primeramente, se debe establecer el orden del polinomio de salida, que en este caso se requiere un polinomio de segundo orden, se debe también precisar el método de cálculo a ser utilizado, generalmente, la función utiliza el método de los mínimos cuadrados.

Sin embargo, para los requerimientos de la obtención de las curvas características, se aplica el método bicuadrado por su robustez, así como la precisión en lo que respecta al ajuste de curva, posteriormente se obtienen los coeficientes del polinomio en variables separadas para realizar posteriores cálculos; finalmente, se evalúa el polinomio con el número de datos

establecido para cada vector, con el fin de elaborar la gráfica del polinomio evaluado.

c.3. Programación para la obtención de la curva característica del sistema

La curva característica es el sistema, es decir la instalación del sistema de entrenamiento para bomba centrífuga, comprendida por el conjunto de válvulas, tuberías, codos, etc, esta curva constituye la altura total requerida por la instalación en función del caudal, para su obtención se deben monitorear las presiones a la impulsión y a la succión de la bomba mediante los transmisores Georg Fischer Signet 8450-1, además de proporcionar una regulación del caudal a la salida de la bomba y el medio necesario para la medición del caudal que suministra la bomba como lo es el transmisor de flujo Georg Fischer Signet 8550-1. Para graficar la curva del sistema se requiere ingresar los valores de caudal y presión diferencial (altura total) como se indica en la Figura 68, para almacenar los datos en dos vectores a máxima frecuencia y válvula de control completamente abierta.

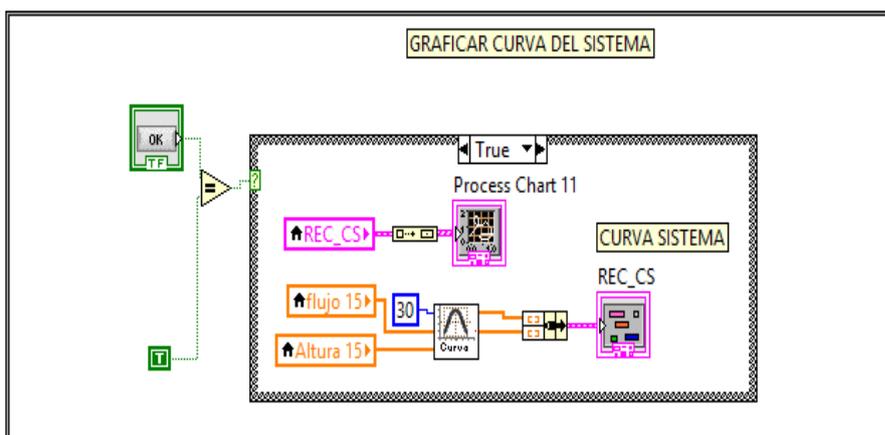


Figura 68 Programación de la curva característica del Sistema

c.4. Programación para la construcción de la curva característica del sistema

Para la construcción de la curva del sistema se requieren todos los valores obtenidos de los vectores de flujo y presión diferencial (altura total), estos valores son enviados a un Sub VI con la programación como se indica en la Figura 69.

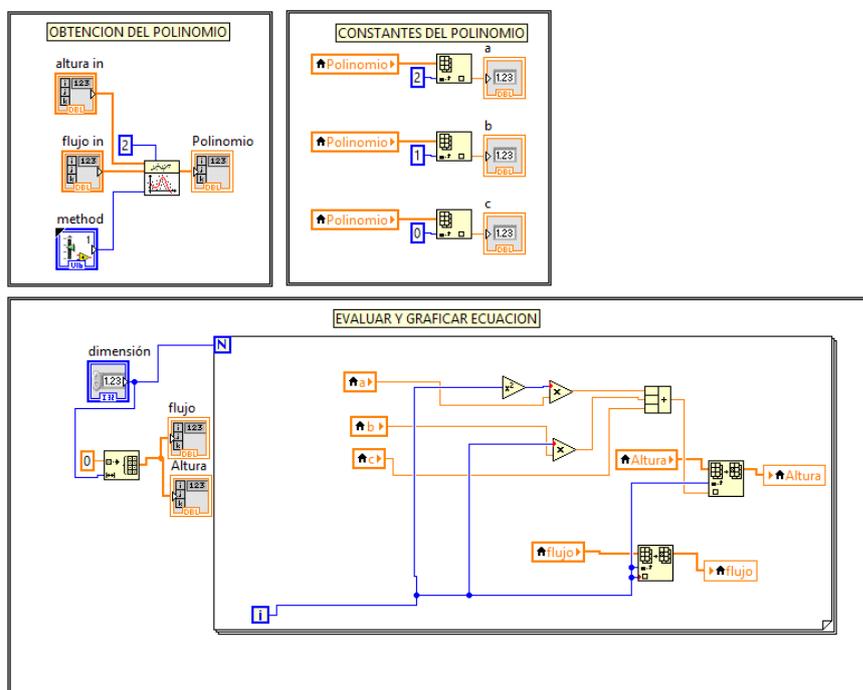


Figura 69 Programación para la construcción de las curva del sistema

d. Curvas características del método de control de caudal por estrangulamiento

d.1. Programación para la obtención de la curva característica de la bomba (operación constante)

Para este método de control de caudal se requiere utilizar una velocidad de operación constante, en este caso la máxima frecuencia a la que trabaja la bomba centrífuga (60 Hz), se monitorean las presiones a la impulsión y a la succión de la bomba mediante los transmisores de presión Georg Fischer Signet 8450-1, además se proporciona una regulación del flujo a la salida de la bomba y el medio necesario para la medición del flujo que suministra la bomba como lo es el transmisor de flujo Georg Fischer Signet 8550-1, la

presión diferencial se obtiene a partir del uso de la ecuación 3.1 como se indicó anteriormente.

Para graficar la curva de la bomba a velocidad de operación constante (60 Hz) se requiere ingresar los valores a cada nivel de caudal con su respectiva presión diferencial, para almacenar los datos en dos vectores para posteriormente graficar la curva característica como se indica en la Figura 70.

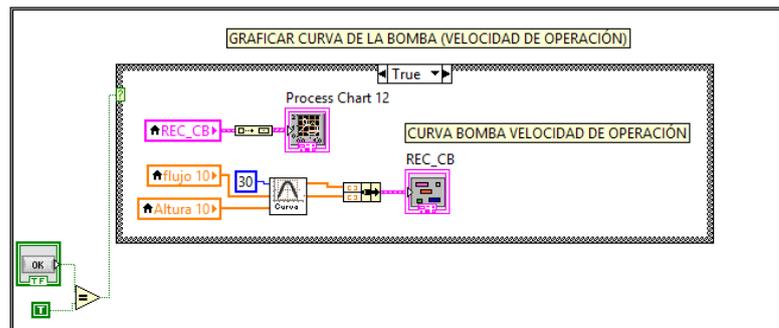


Figura 70 Obtención curva característica de la bomba por estrangulamiento

d.2. Programación para la construcción de la curva característica de la bomba (operación constante)

Para la construcción de la curva de la bomba a velocidad de operación constante (60 Hz) se requieren todos los valores obtenidos de los vectores de flujo y presión diferencial (altura total), estos valores son enviados a un Sub VI con la programación como se indica en la Figura 71.

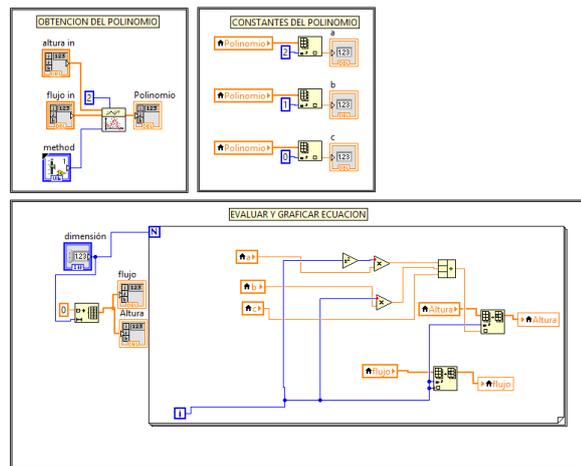


Figura 71 Construcción de las curvas características por estrangulamiento

d.3. Programación para la obtención de las curvas características por estrangulamiento

Las curvas características por estrangulamiento son el sistema, es decir la instalación del sistema de entrenamiento para bomba centrífuga, comprendida por el conjunto de válvulas, tuberías, codos, válvula de control etc, estas curvas constituyen la altura total requerida por la instalación en función del caudal, para su obtención se deben monitorear las presiones a la impulsión y a la succión de la bomba mediante los transmisores Georg Fischer Signet 8450-1, además de proporcionar una regulación del caudal a la salida de la bomba y el medio necesario para la medición del caudal que suministra la bomba como lo es el transmisor de flujo Georg Fischer Signet 8550-1.

Esta regulación de caudal se logra mediante la puesta en servicio de una válvula de control bridada Badger Meter en el proceso el cual mediante un conversor I/P que recibe una señal eléctrica de 4-20 mA desde el PLC realiza el estrangulamiento del caudal en forma proporcional de 3-15 psi. Para graficar la curva del sistema se requiere ingresar los valores de caudal y presión diferencial (altura total), para poder almacenar los datos en diez vectores a estrangulamiento de válvula a 15, 12, 9, 6.5 y 5 psi, para posteriormente graficar la curva característica como se indica en la Figura 72.

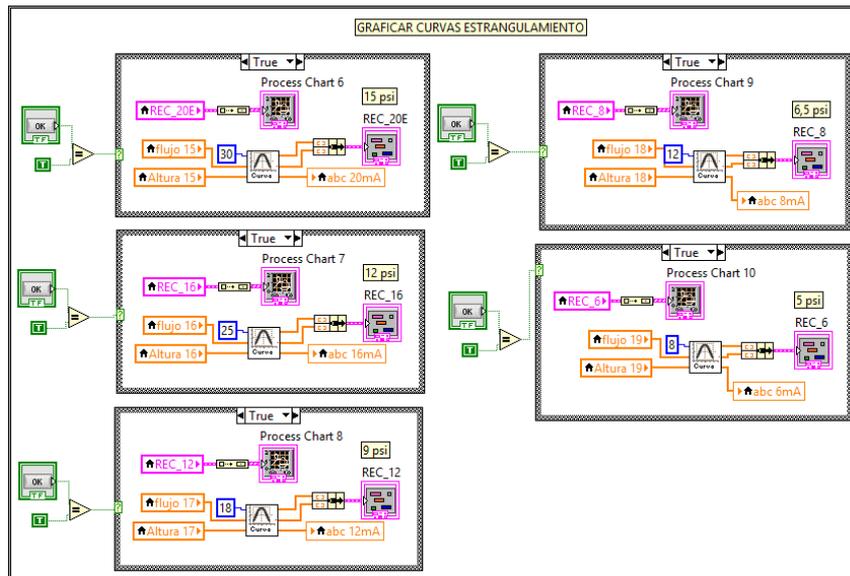


Figura 72 Obtención curvas características por estrangulamiento

d.4. Programación para la construcción de las curvas características por estrangulamiento

Para la construcción de la curvas por estrangulamiento se requieren todos los valores obtenidos de los vectores de flujo y presión diferencial (altura total), estos valores son enviados a un Sub VI con la programación como se indica en la Figura 73.

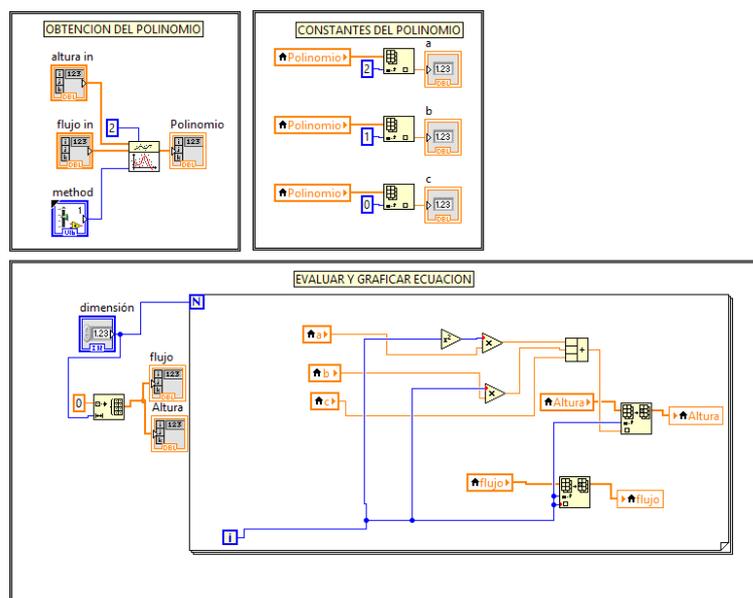


Figura 73 Construcción de las curvas características por estrangulamiento

e. Programación para la obtención de los puntos de operación y cálculo de la potencia hidráulica

Los puntos de operación se determinan mediante el ingreso de los vectores que contienen las constantes de los polinomios entre las dos curvas que son objeto de obtención del punto de operación a un Sub VI, como se muestra en la Figura 74, el cual tiene como función, obtener el punto de intersección entre dos curvas, las cuales, son: curva obtenida mediante control por estrangulamiento y curva obtenida mediante control por variador de frecuencia.

Para lo cual, se restan las constantes de los polinomios que ingresan al Sub VI, con lo que se obtiene un nuevo polinomio, cuyas raíces son la intersección entre las dos curvas; a continuación, se obtiene las raíces del polinomio resultante, de las mismas que se obtiene solamente la raíz positiva, la cual es el punto de operación concerniente al flujo. Se evalúa el flujo en el polinomio resultante para obtener la altura del punto de operación. Una vez obtenidos los valores de flujo y altura del punto de operación, se procede a calcular la potencia hidráulica del punto de operación.

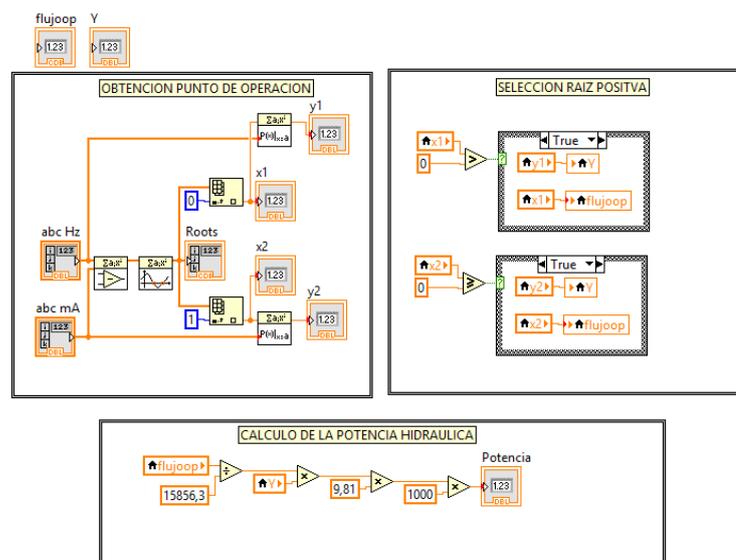


Figura 74 Obtención puntos de operación y cálculo de potencia hidráulica

f. Cálculo de la potencia hidráulica

Mediante la ecuación 3.2 se calcula la potencia hidráulica en cada punto de operación de los métodos de control de caudal implementados.

$$Ph = QHpg \quad (3.2)$$

Donde:

Ph : Potencia hidráulica, [W]

Q : Caudal, $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

H : Carga total, [m]

p : Densidad del fluido, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

g : Aceleración de la gravedad, $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

g. Cálculo de la eficiencia de la bomba centrífuga

La eficiencia de una bomba centrífuga representa la capacidad que tiene la bomba de trabajar en los niveles apropiados, en el eje X se encuentra el caudal y en el eje Y se encuentra la eficiencia en porcentaje, para determinar la eficiencia se toman los valores de los vectores de caudal y altura total, a una velocidad de operación constante, estos valores se aplican en la ecuación 3.3, los cuales son graficados mediante la programación como se muestra en la Figura 75.

$$n_b = \frac{QHpg}{P_{em}} * 100\% \quad (3.3)$$

Donde:

n_b : Eficiencia de la bomba, [%]

Q : Caudal, $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

H : Carga total, [m]

p : Densidad del fluido, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

g : Aceleración de la gravedad, $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

P_{em} : Potencia de entrada al motor, [W]

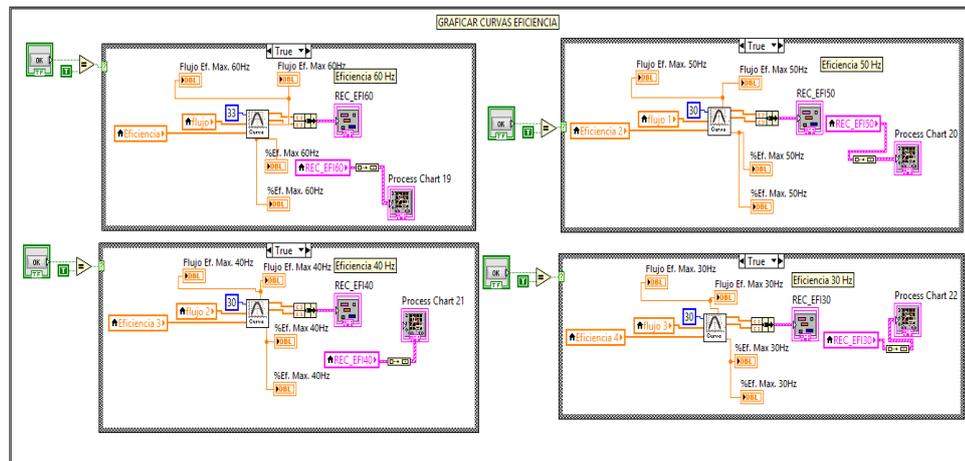


Figura 75 Obtención de las curvas de eficiencia de la bomba centrífuga

h. Programación para la construcción de las curvas de eficiencia de la bomba centrífuga

Para la construcción de las curvas de eficiencia se requieren todos los valores obtenidos de la ecuación 3.3 dando como resultado un nuevo vector de flujo y eficiencia expresado en porcentaje, estos valores son enviados a un Sub VI con la programación como se indica en la Figura 76.

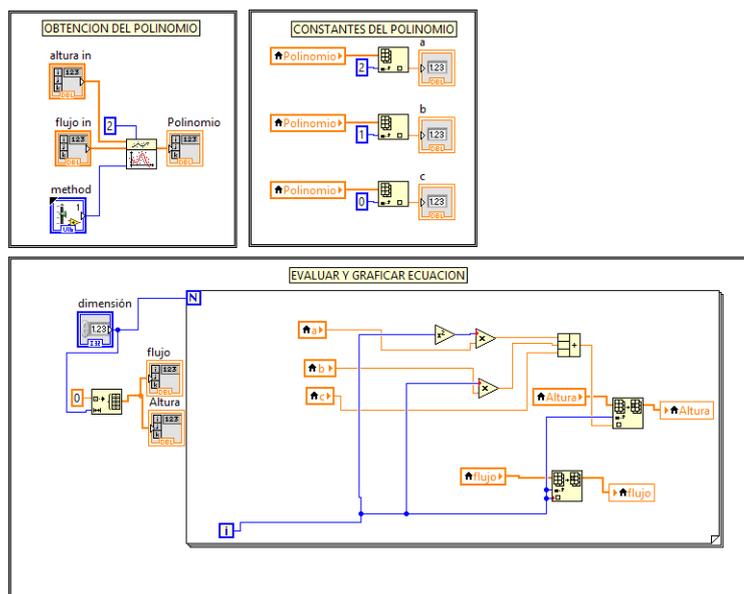


Figura 76 Construcción de las curvas de eficiencia de la bomba centrífuga

i. Configuración del servidor web en LabView

Mediante el uso de la herramienta servidor web de LabView, el proceso desarrollado en el panel frontal de este mismo software permite ser visualizado o controlado en un navegador web, los pasos se detallan a continuación.

1. En la pestaña Tools se selecciona el ítem opciones en el cual se despliega la Figura 77 donde en la opción Web Server se habilita el ítem Enable Remote Panel Server.

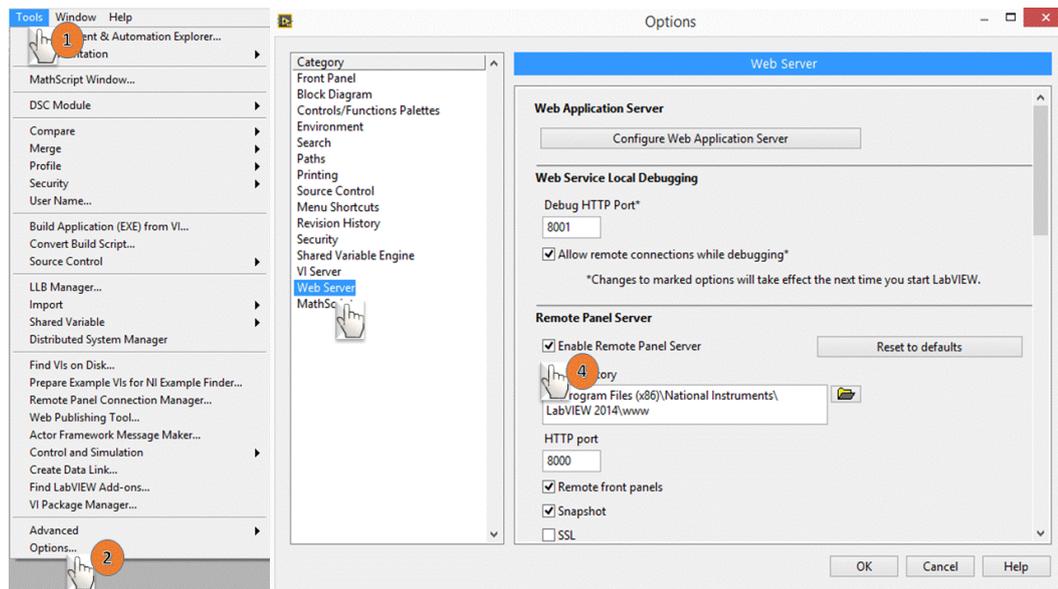


Figura 77 Habilitar la herramienta Servidor Web de LabView

2. En la pestaña herramientas seleccionamos la opción Web Publishing Tool en el cual se selecciona el Vi que se desea mostrar en el navegador web y con la opción embedded que permite visualizar y controlar el panel frontal de forma remota como se muestra en la Figura 78, y se da click en next.

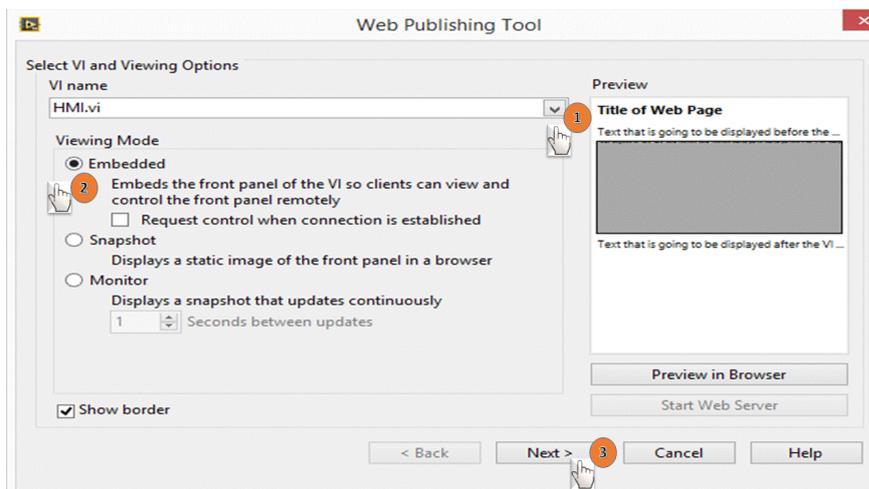


Figura 78 Publicar servidor web

3. En la ventana siguiente se procede a poner el texto que se desea que aparezca en el navegador web como se observa en la Figura 79, y se da click en next.

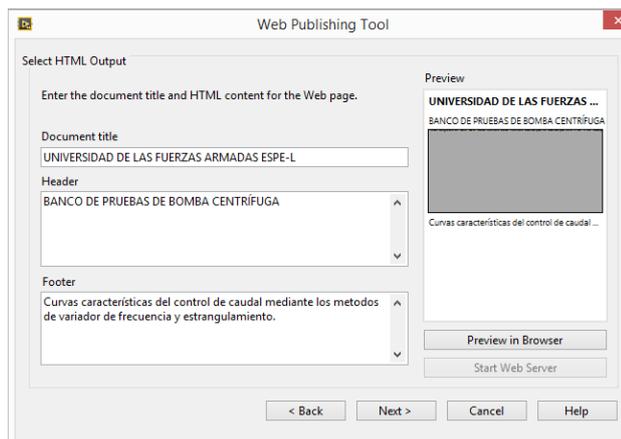


Figura 79 Texto del servidor web

4. En la última ventana se encuentra la carpeta de destino que viene dada por default y también se puede observar la dirección URL con la cual se puede visualizar o controlar, previos permisos de autor, el panel frontal creado en el software LabView, se da click en Save to Disk y a continuación Connect, como se observa en la Figura 80, de esta manera el servidor web ya queda configurado y listo para ser usado en otra máquina que tenga Internet Explorer, mediante la dirección <http://Marcelo:8000/HMI.html>.

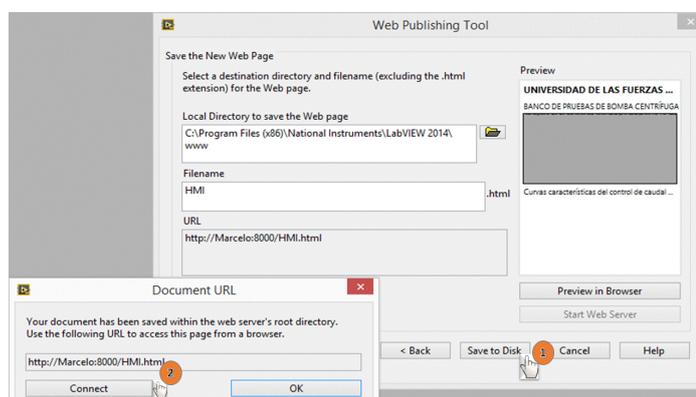


Figura 80 Conexión al servidor web

5. Como motivo de uso didáctico, el panel frontal se puede observar en forma de capturas de pantallas en cualquier plataforma móvil como Android, ios, Windows móvil etc, por medio de la dirección 192.162.0.102:8000/.snap?HMI.vi, de tal manera que cualquier

cambio realizado en el panel frontal con una actualización de la página web se puede observar los cambios realizados.

3.8. Conexiones del registrador trifásico FLUKE 1735

El registrador trifásico FLUKE 1735 se utiliza para la medición de potencia, para posteriormente obtener las curvas de eficiencia de la bomba centrífuga, la conexión que se realiza es la de fase dividida como se muestra en la Figura 81.

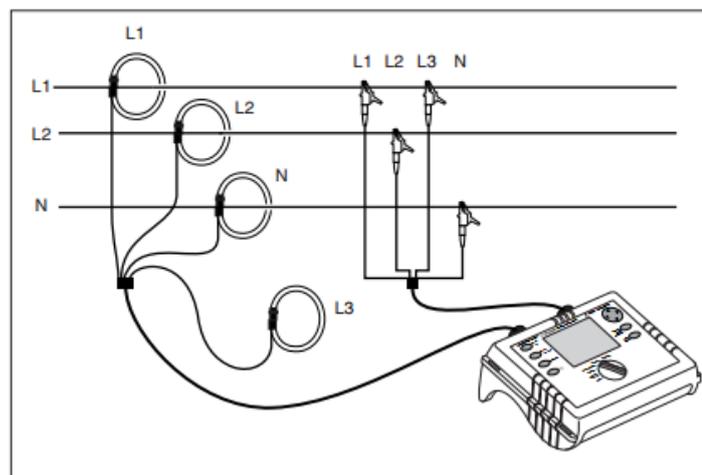


Figura 81 Conexión fase dividida registrador FLUKE 1735

Una vez establecida la conexión fase delta, mediante el selector giratorio que se encuentra en el registrador, se selecciona la medición de potencia en la cual se puede visualizar los valores instantáneos y en tiempo real de la potencia, potencia reactiva y factor de potencia, como se puede observar en la Figura 82, a cada variación de caudal que se le asigne al proceso. Dichos valores se utilizan en el software LabView para la construcción de las curvas características de eficiencia de la bomba centrífuga a diferentes velocidades de operación.

Potencia		2006-03-06, 11:14	
L ¹²³	5.38 _{tot} kW	7.02 _{tot} kVA	0.767 _{tot} PF
L1	1.78	2.33	0.767
L2	1.82	2.37	0.768
L3	1.78	2.32	0.767

Figura 82 Pantalla de medición de potencia registrador FLUKE 1735

CAPITULO IV

4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Consideraciones Generales

Las pruebas del sistema de entrenamiento para bomba centrífuga se lo realizan a lazo cerrado, con el interruptor en modo local, de esta manera se puede realizar un control de caudal tanto desde la PC como desde la TOUCH.

Para la obtención de las curvas características de los controles de caudal mediante estrangulamiento y por variador de frecuencia se realiza mediante un control PID previamente configurando en el PLC para así obtener una variación de caudal de forma automatizada y controlada, mediante el software LabVIEW se obtiene la visualización de las curvas características para el sistema de entrenamiento para bomba centrífuga.

En el presente capítulo se detalla todo acerca de las pruebas realizadas y todos los cálculos utilizados para la obtención de las curvas características de la bomba a diferentes velocidades de operación, la curva del sistema, las curvas de estrangulamiento a diferentes aperturas en forma proporcional, sus intersecciones, las cuales representan el punto óptimo de operación en los métodos de control de caudal implementados y las curvas de eficiencia de la bomba centrífuga a diferentes velocidades de operación.

Además se realiza una comparación energética entre los métodos de control de caudal implementados demostrando así la influencia de implementar estos controles en el ámbito industrial.

4.2. Modo de utilización

Para utilizar el banco de pruebas de bomba centrífuga, el usuario debe realizar las conexiones eléctricas y neumáticas de los instrumentos y equipos en el panel lateral como se muestra en la Figura 83.

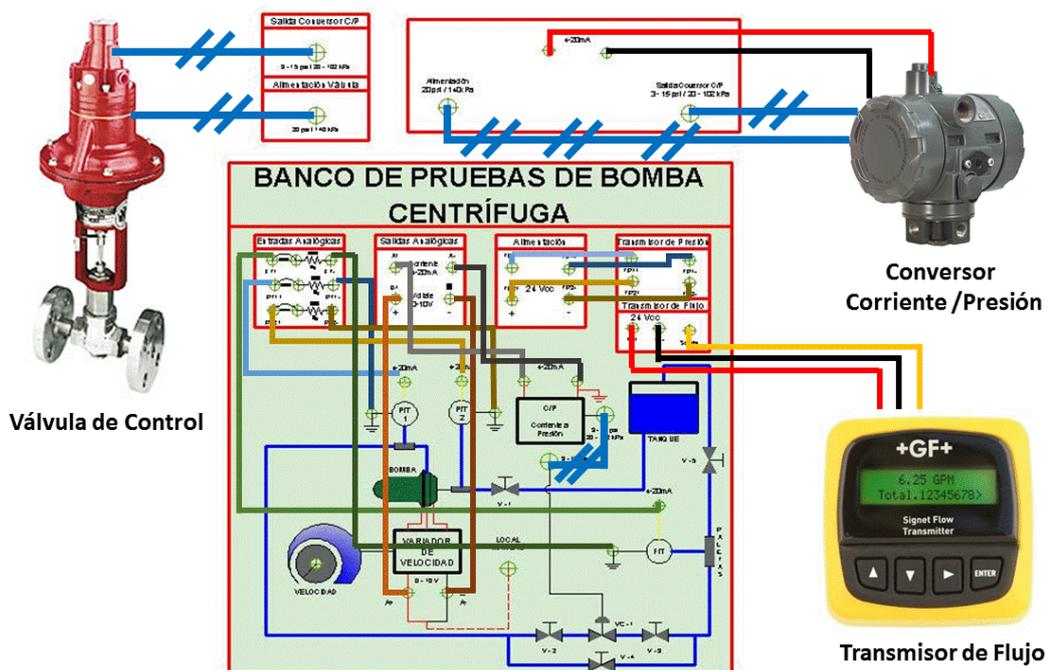


Figura 83 Conexiones eléctricas y neumáticas del Proceso

4.3. Control de caudal por el método de variador de frecuencia

4.3.1. Curva característica de la bomba a 60 Hz

Se obtienen 23 datos para los vectores de flujo (vector izquierda) y presión diferencial (vector derecha) para la curva de la bomba a 60 Hz como se muestra en la Tabla 3, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional, para cada valor de flujo que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la presión diferencial (altura total).

Tabla 3**Vectores obtenidos curva característica de la bomba a 60 Hz**

Frecuencia a 60 Hz	
[GPM]	[m]
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

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 4, estos datos se obtienen a partir del uso de la herramienta “General Polynomial Fit”, el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva. El polinomio de la ecuación 4.1, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 84, en donde el flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = -0.00687x^2 + 0.009249x + 26.0063 \quad (4.1)$$

Tabla 4**Vectores generados del Sub VI construcción curva de la bomba**

Frecuencia a 60 Hz	
[GPM]	[m]
0	26,0063
1	26,0087
2	25,9973
3	25,9722
4	25,9333
5	25,8806
6	25,8142
7	25,734
8	25,6401
9	25,5324
10	25,4109
11	25,2757
12	25,1268
13	24,9641
14	24,7876
15	24,5973
16	24,3933
17	24,1756
18	23,6988
19	23,4398
20	23,167
21	23,167
22	22,8805
23	22,5802
24	22,2661
25	21,9383
26	21,5967
27	21,2414
28	20,8723
29	20,4895
30	20,0929
31	19,6825
32	19,2584
33	18,8205
34	18,3689
35	17,9035

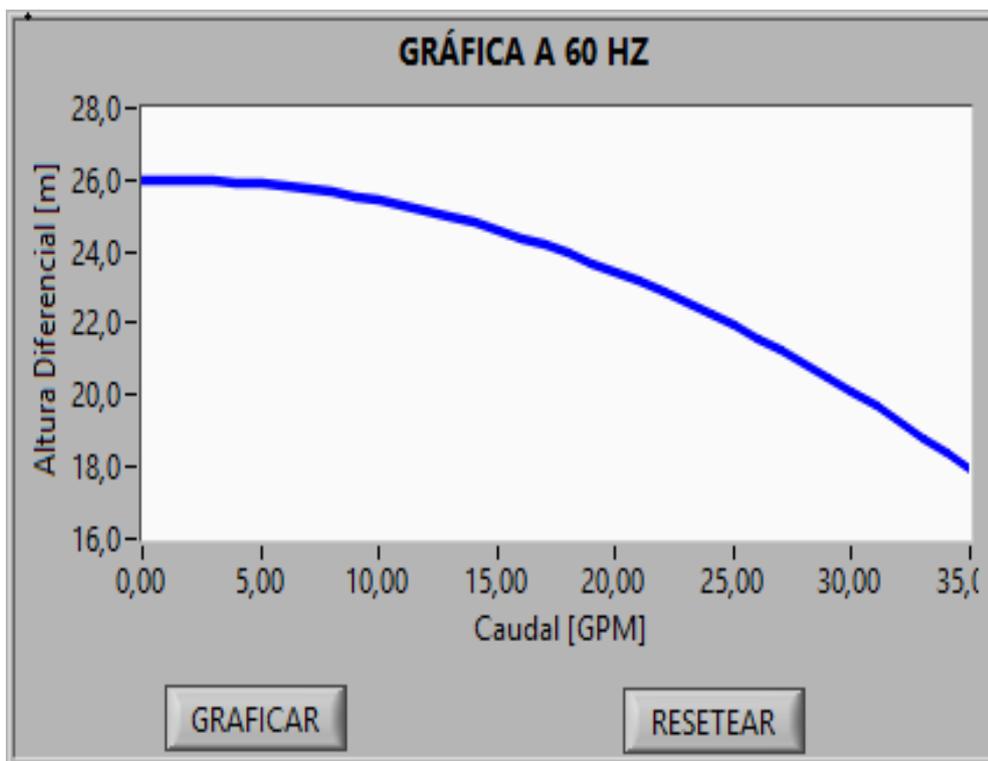


Figura 84 Curva característica de la bomba a 60 Hz

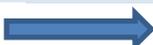
4.3.2. Curva característica de la bomba a 50 Hz

Se obtienen 20 datos para los vectores de flujo (vector izquierda) y presión diferencial (vector derecha) para la curva de la bomba a 50 Hz como se muestra en la Tabla 5, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional, para cada valor de flujo que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la presión diferencial (altura total).

Tabla 5

Vectores obtenidos curva característica de la bomba a 50 Hz

Frecuencia a 50 Hz	
[GPM]	[m]
0,00198924	17,6923
1,00854	16,8659
2,00615	16,7737
3,00873	16,7536
4,00136	16,8785
5,0099	16,8867

Continúa 

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

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 6, estos datos se obtienen a partir del uso de la herramienta “General Polynomial Fit”, el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva. El polinomio de la ecuación 4.3, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 85, en donde el flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = -0.0117147x^2 + 0.130606x + 16.558438 \quad (4.3)$$

Tabla 6

Vectores generados del Sub VI construcción curva de la bomba

Frecuencia a 50 Hz	
[GPM]	[m]
0	16,5584
1	16,6773
2	16,7728
3	16,8448
4	16,8934
5	16,9186
6	16,9203

Continúa 

7	16,8987
8	16,8536
9	16,785
10	16,693
11	16,5776
12	16,4388
13	16,2765
14	16,0909
15	15,8817
16	15,6492
17	15,3932
18	15,1138
19	14,811
20	14,4847
21	14,135
22	13,7619
23	13,3653
24	12,9453
25	12,5019
26	12,0351
27	11,5448
28	11,0311
29	10,494
30	9,93343
31	9,34944
32	8,74202
33	8,11118

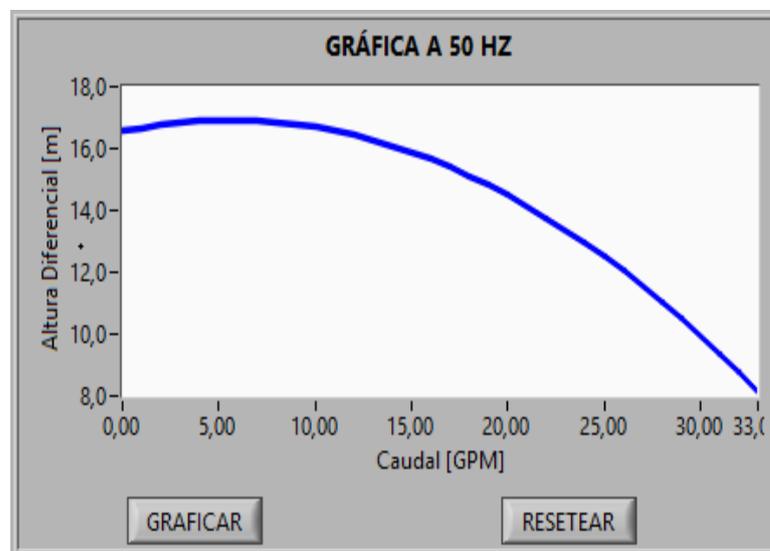


Figura 85 Curva característica de la bomba a 50 Hz

4.3.3. Curva característica de la bomba a 40 Hz

Se obtienen 17 datos para los vectores de flujo (vector izquierda) y presión diferencial (vector derecha) para la curva de la bomba a 40 Hz como se muestra en la Tabla 7, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional, para cada valor de flujo que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la presión diferencial (altura total).

Tabla 7

Vectores obtenidos curva característica de la bomba a 40 Hz

Frecuencia a 40 Hz	
[GPM]	[m]
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

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 8, estos datos se obtienen a partir del uso de la herramienta "General Polynomial Fit", el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva.

El polinomio de la ecuación 4.4, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 86, en donde el flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = -0.00981385x^2 + 0.0848154x + 9.10671878 \quad (4.4)$$

Tabla 8

Vectores generados del Sub VI construcción curva de la bomba

Frecuencia a 40 Hz	
[GPM]	[m]
0	9,10672
1	9,18172
2	9,23709
3	9,27284
4	9,28896
5	9,28545
6	9,26231
7	9,21955
8	9,15716
9	9,07514
10	8,97349
11	8,85221
12	8,71131
13	8,55078
14	8,37062
15	8,17083
16	7,95142
17	7,71238
18	7,45371
19	7,17541
20	6,87749
21	6,55993
22	6,22275
23	5,86594
24	5,48951
25	5,09345
26	4,67775
27	4,24244
28	3,78749

Continúa 

29	3,31292
30	2,81871
31	2,30488

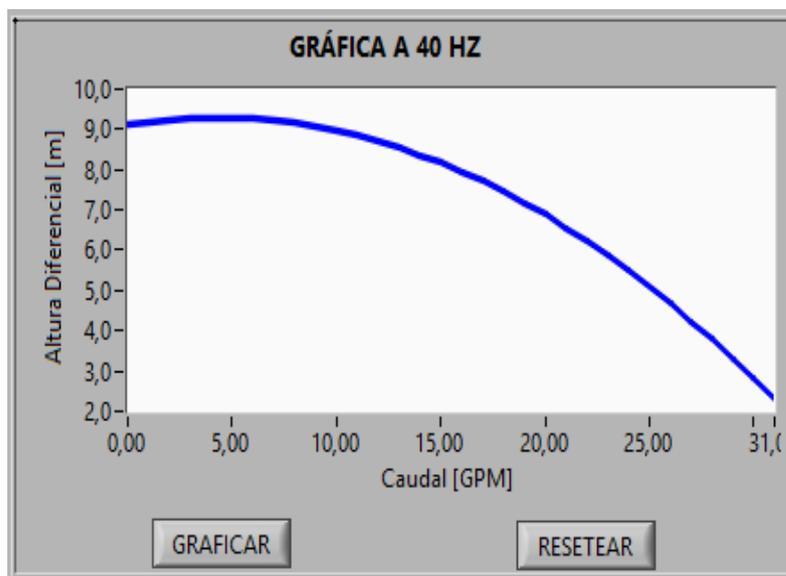


Figura 86 Curva característica de la bomba a 40 Hz

4.3.4. Curva característica de la bomba a 30 Hz

Se obtienen 15 datos para los vectores de flujo (vector izquierda) y presión diferencial (vector derecha) para la curva de la bomba a 30 Hz como se muestra en la Tabla 9, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional, para cada valor de flujo que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la presión diferencial (altura total).

Tabla 9

Vectores obtenidos curva característica de la bomba a 30 Hz

Frecuencia a 30 Hz	
[GPM]	[m]
0,00298386	3,33206
1,00854	3,23133
2,00217	3,19425
3,00176	3,26175
4,00633	3,25626
5,00493	3,30331

Continúa 

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

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 10, estos datos se obtienen a partir del uso de la herramienta “General Polynomial Fit”, el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva. El polinomio de la ecuación 4.5, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 87, en donde el flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = -0.0057401x^2 + 0.04222x + 3.178769 \quad (4.5)$$

Tabla 10

Vectores generados del Sub VI construcción curva de la bomba

Frecuencia a 30 Hz	
[GPM]	[m]
0	3,17877
1	3,21525
2	3,24025
3	3,25377
4	3,25581
5	3,24637
6	3,22545
7	3,19304
8	3,14916
9	3,0938
10	3,02696
11	2,94864

Continúa 

12	2,85883
13	2,75755
14	2,64479
15	2,52055
16	2,38482
17	2,23762
18	2,07894
19	1,90877
20	1,72713
21	1,534
22	1,3294
23	1,11331
24	0,885749
25	0,646704
26	0,396179
27	0,134174
28	-0,139312
29	-0,424278

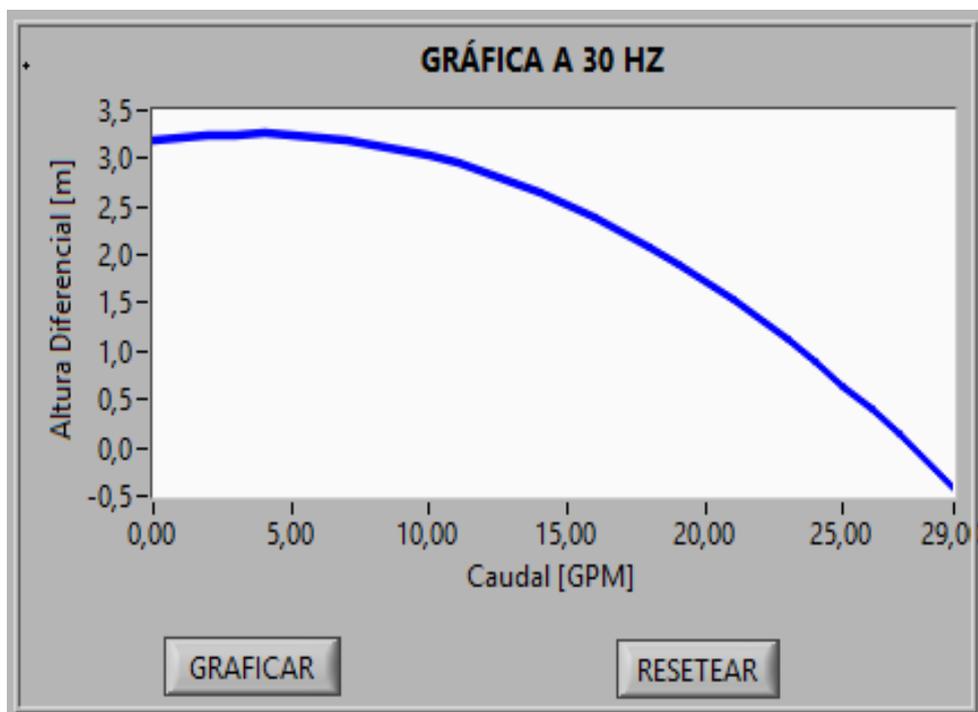


Figura 87 Curva característica de la bomba a 30 Hz

4.3.5. Curva característica de la bomba a 20 Hz

Se obtienen 10 datos para los vectores de flujo (vector izquierda) y presión diferencial (vector derecha) para la curva de la bomba a 20 Hz como

se muestra en la Tabla 11, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional, para cada valor de flujo que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la presión diferencial (altura total).

Tabla 11

Vectores obtenidos curva característica de la bomba a 20 Hz

Frecuencia a 20 Hz	
[GPM]	[m]
0,00298386	-1,05197
1,00357	-1,08795
2,00118	-1,04806
3,00475	-1,01414
4,00136	-1,05486
5,00493	-1,07089
6,00949	-1,13329
7,00113	-1,16001
8,00271	-1,21997
9,00131	-1,28183

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 12, el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva. El polinomio de la ecuación 4.6, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 88, en donde el flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = -0.0052883x^2 + 0.0227246x - 1.061254 \quad (4.6)$$

Tabla 12

Vectores del Sub VI construcción curva de la bomba

Frecuencia a 20 Hz	
[GPM]	[m]
0	-1,06125
1	-1,04382

Continúa 

2	-1,03696
3	-1,04067
4	-1,05497
5	-1,07984
6	-1,11528
7	-1,16131
8	-1,21791
9	-1,28508
10	-1,36284
11	-1,45117
12	-1,55007
13	-1,65955
14	-1,77961
15	-1,91025
16	-2,05146
17	-2,20325
18	-2,36562
19	-2,53856
20	-2,72208
21	-2,91617
22	-3,12084
23	-3,33609
24	-3,56192
25	-3,79832
26	-4,0453
27	-4,30285

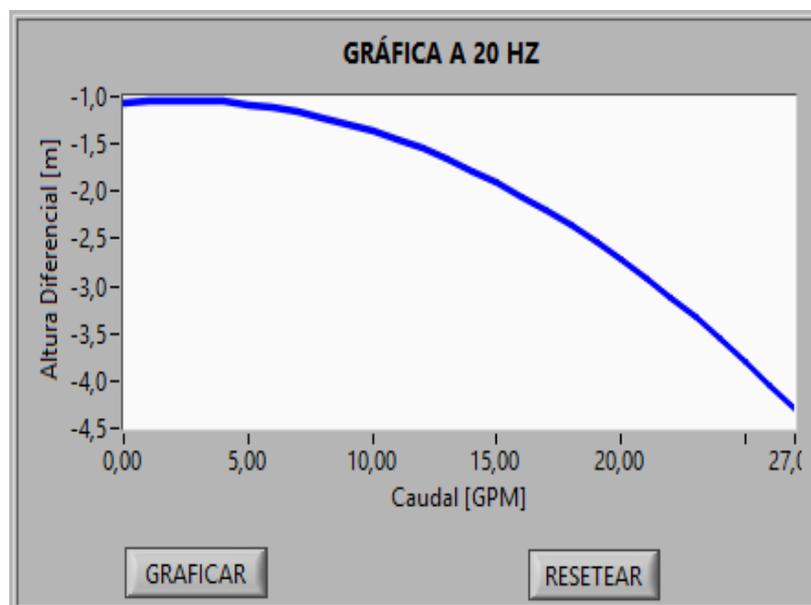


Figura 88 Curva característica de la bomba a 20 Hz

4.3.6. Curva característica del sistema

Se obtienen 16 datos para los vectores de flujo y presión diferencial para la curva del sistema a máxima frecuencia y válvula de control completamente abierta como se muestra en la Tabla 13, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional, para cada valor de caudal que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la altura total.

Tabla 13

Vectores obtenidos curva característica del sistema

Estrangulamiento a 15 psi	
[GPM]	[m]
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	-0,433715
12,012	0,278701
13,0086	1,11477
14,0052	2,70638
15,0038	6,15919

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 14, estos datos se obtienen a partir del uso de la herramienta "General Polynomial Fit", el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva. El polinomio de la ecuación 4.7, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 89, en donde el

flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = 0.0359344x^2 - 0.0968029x - 3.72173184 \quad (4.7)$$

Tabla 14

Vectores generados del Sub VI construcción curva del sistema

Estrangulamiento a 15 psi	
[GPM]	[m]
0	-3,72173
1	-3,7826
2	-3,7716
3	-3,68873
4	-3,53399
5	-3,30739
6	-3,00891
7	-2,63857
8	-2,19635
9	-1,68227
10	-1,09632
11	-0,438503
12	0,291185
13	1,09274
14	1,96617
15	2,91146
16	3,92862
17	5,01766
18	6,17856
19	7,41133
20	8,71596
21	10,0925
22	11,5408
23	13,0611
24	14,6352
25	16,3172
26	18,053
27	19,8608
28	21,7403
29	23,6918

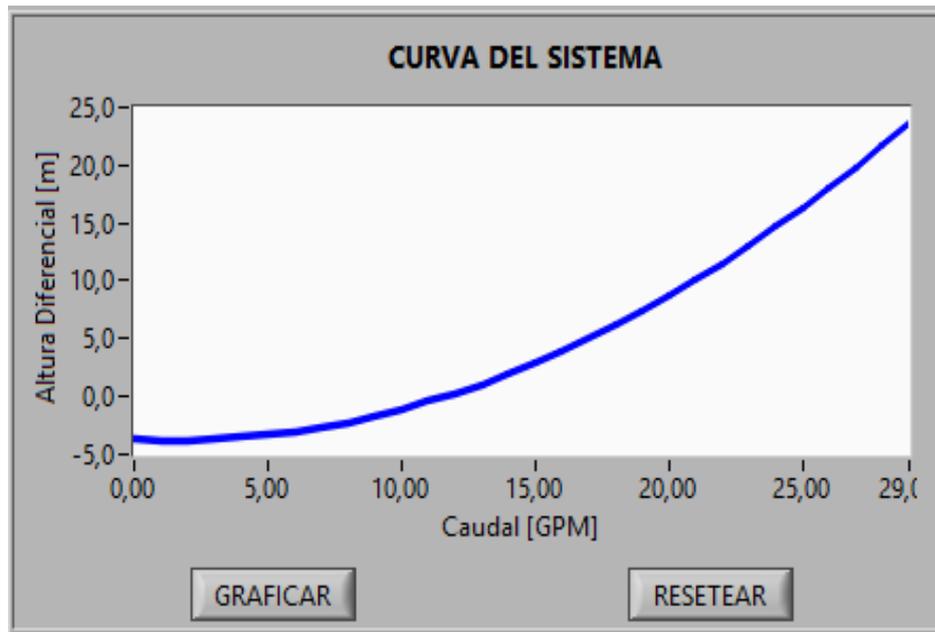


Figura 89 Curva característica del sistema

4.3.7. Puntos de operación entre curva de la bomba y curva del sistema

En la Figura 90, se muestran las curvas de la bomba y la curva del sistema, en la cual se puede notar que a medida que disminuye la velocidad de operación de la bomba disminuye de misma manera el caudal y la presión diferencial, esto indica que la bomba disminuye el consumo de energía por lo que solo está consumiendo la energía necesaria para impulsar el caudal del proceso.

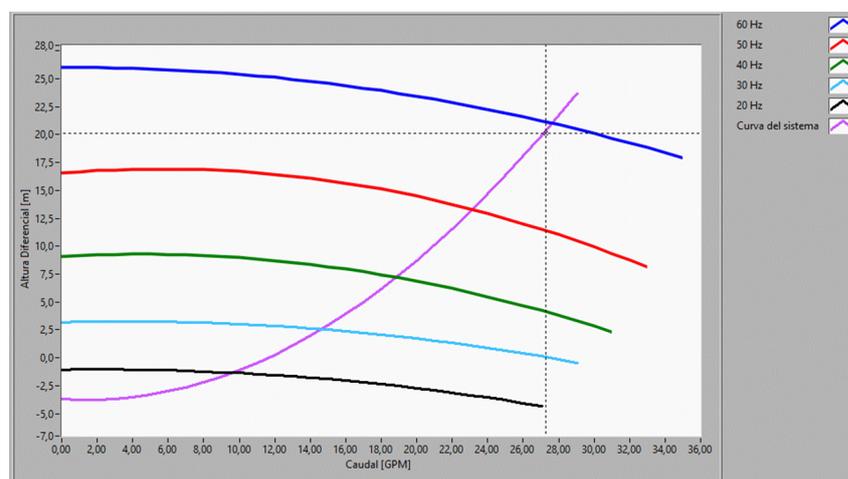


Figura 90 Curvas características por variador de frecuencia

La curva característica de la bomba indica el trabajo de la bomba centrífuga durante su operación, para cada velocidad de operación se genera una curva diferente de la bomba centrífuga debido al cambio de caudal que circula por la tubería y la altura total del mismo.

Obtenidas las curvas de la bomba a sus diferentes velocidades de operación y la curva del sistema, se puede encontrar el punto de operación el cual es la intersección entre las curvas de la bomba y del sistema, tal como se muestra en la Figura 91.

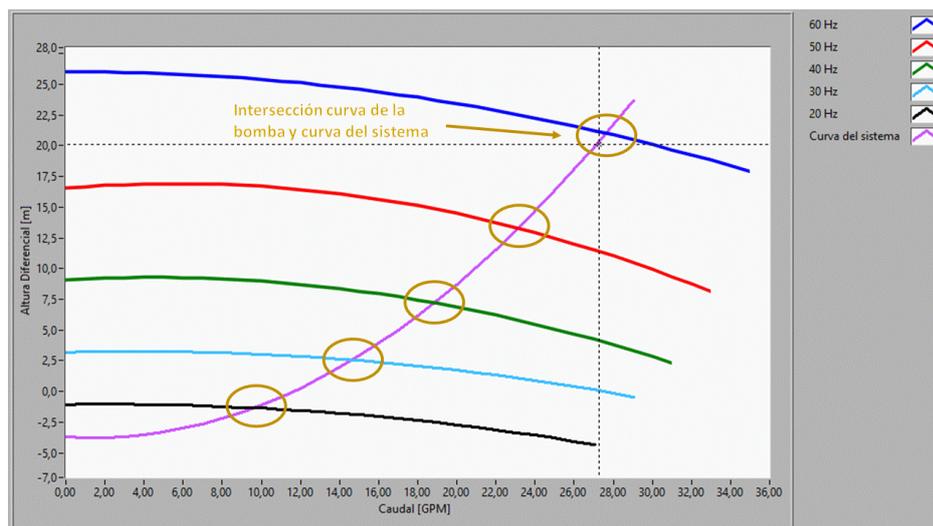


Figura 91 Puntos de operación mediante variador de frecuencia

Sobre la curva del sistema se tienen los distintos puntos de operación al variar la velocidad de operación de la bomba, de esta manera si se modifican las curvas de la bomba las intersecciones de las curvas se desplazan.

Los puntos de operación se determinan para saber donde existe una mayor eficiencia de funcionamiento de operación de la bomba centrífuga además de la energía consumida por la bomba a sus diferentes velocidades de operación como se observa en la Figura 92.

	Caudal		Altura		Potencia Hidráulica
OP 60Hz	27,6185	GPM	21,0147	m	359,08 W
OP 50Hz	23,1543	GPM	13,3021	m	190,554 W
OP 40Hz	18,8478	GPM	7,21904	m	84,1796 W
OP 30Hz	14,6434	GPM	2,56616	m	23,2485 W
OP 20Hz	9,61318	GPM	-1,33151	m	-7,91912 W

Figura 92 Datos puntos de operación por variador de frecuencia

4.4. Método del control de caudal por estrangulamiento

4.4.1. Curva característica de la bomba (velocidad de operación constante)

Se obtienen 23 datos para los vectores de flujo (vector izquierda) y presión diferencial (vector derecha) para la curva de la bomba a velocidad de operación constante de 60 Hz como se muestra en la Tabla 15, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional, para cada valor de flujo que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la presión diferencial.

Tabla 15

Vectores obtenidos curva característica de la bomba

Frecuencia a 60 Hz	
[GPM]	[m]
0,00298386	27,114
1,00854	26,295
2,00714	26,1888
3,00574	26,0486
4,00335	25,9186
5,00095	25,6379

Continúa 

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

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 16, el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva. El polinomio de la ecuación 4.8, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 93, en donde el flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = -0.00687x^2 + 0.009249x - 26.0063 \quad (4.8)$$

Tabla 16

Vectores del Sub VI construcción curva de la bomba

Frecuencia a 60 Hz	
[GPM]	[m]
0	26,0063
1	26,0087
2	25,9973
3	25,9722
4	25,9333
5	25,8806

Continúa 

6	25,8142
7	25,734
8	25,6401
9	25,5324
10	25,4109
11	25,2757
12	25,1268
13	24,9641
14	24,7876
15	24,5973
16	24,3933
17	24,1756
18	23,6988
19	23,4398
20	23,167
21	23,167
22	22,8805
23	22,5802
24	22,2661
25	21,9383
26	21,5967
27	21,2414
28	20,8723
29	20,4895
30	20,0929
31	19,6825
32	19,2584
33	18,8205
34	18,3689
35	17,9035

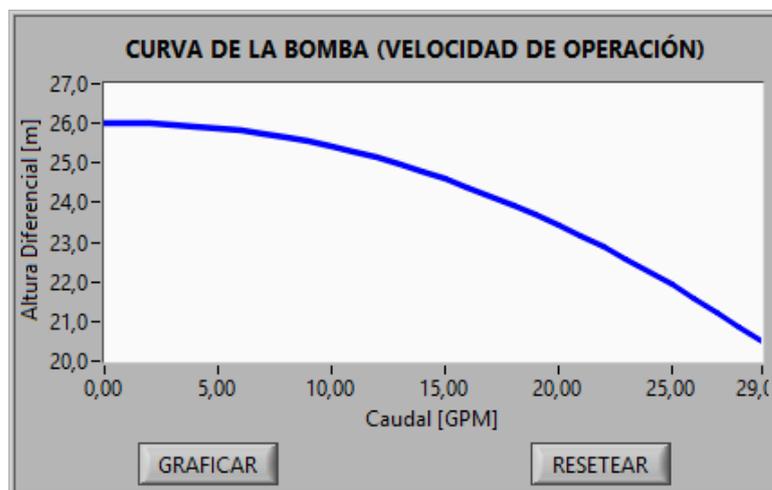


Figura 93 Curva característica de la bomba (velocidad constante)

4.4.2. Curva característica por estrangulamiento a 15 psi

Se obtienen 16 datos para los vectores de flujo y presión diferencial para la curva característica por estrangulamiento de la válvula de control a 15 psi, es decir, se encuentra completamente abierta como se muestra en la Tabla 17, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional, para cada valor de caudal que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la altura total.

Tabla 17

Vectores curva característica por estrangulamiento a 15 psi

Estrangulamiento a 15 psi	
[GPM]	[m]
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

Continúa 

10,0198	-1,01516
11,0005	-0,433715
12,012	0,278701
13,0086	1,11477
14,0052	2,70638
15,0038	6,15919

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 18, el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva. El polinomio de la ecuación 4.9, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 94, en donde el flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = 0.0359344x^2 - 0.0968029x - 3.72173184 \quad (4.9)$$

Tabla 18

Vectores del Sub VI construcción curva por estrangulamiento

Estrangulamiento a 15 psi	
[GPM]	[m]
0	-3,72173
1	-3,7826
2	-3,7716
3	-3,68873
4	-3,53399
5	-3,30739
6	-3,00891
7	-2,63857
8	-2,19635
9	-1,68227
10	-1,09632
11	-0,438503
12	0,291185
13	1,09274
14	1,96617
15	2,91146

Continúa 

16	3,92862
17	5,01766
18	6,17856
19	7,41133
20	8,71596
21	10,0925
22	11,5408
23	13,0611
24	14,6352
25	16,3172
26	18,053
27	19,8608
28	21,7403
29	23,6918

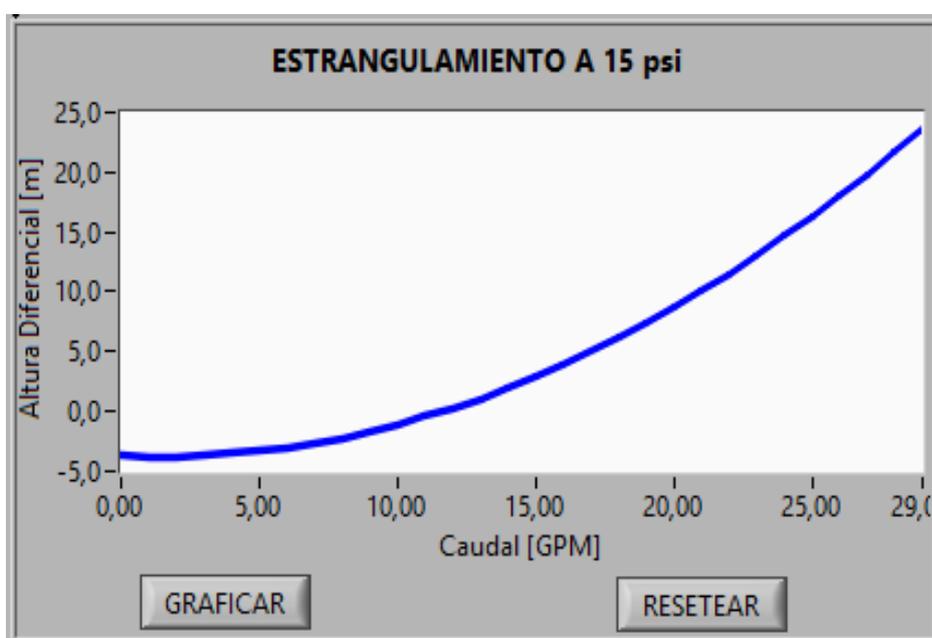


Figura 94 Curva característica de estrangulamiento a 15 psi

4.4.3. Curva característica por estrangulamiento a 12 psi

Se obtienen 15 datos para los vectores de flujo y presión diferencial para la curva característica por estrangulamiento de la válvula de control a 12 psi como se muestra en la Tabla 19, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional, para cada valor de caudal que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la altura total.

Tabla 19**Vectores curva característica por estrangulamiento a 12 psi**

Estrangulamiento a 12 psi	
[GPM]	[m]
0,00298386	-3,76219
1,01551	-3,74606
2,00018	-3,68086
3,00375	-3,53286
4,00335	-3,25969
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

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 20, el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva. El polinomio de la ecuación 4.10, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 95, en donde el flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = 0.0552191x^2 - 0.111754x - 3.71139405 \quad (4.10)$$

Tabla 20**Vectores del Sub VI construcción curva por estrangulamiento**

Estrangulamiento a 12 psi	
[GPM]	[m]
0	-3,71139
1	-3,76793

Continúa 

2	-3,71403
3	-3,54969
4	-3,27491
5	-2,88969
6	-2,39403
7	-1,78794
8	-1,07141
9	-0,244435
10	0,692974
11	1,74082
12	2,89911
13	4,16783
14	5,54699
15	7,03659
16	8,63663
17	10,3471
18	12,168
19	14,0994
20	16,1412
21	18,2934
22	20,5561
23	22,9292
24	25,4127

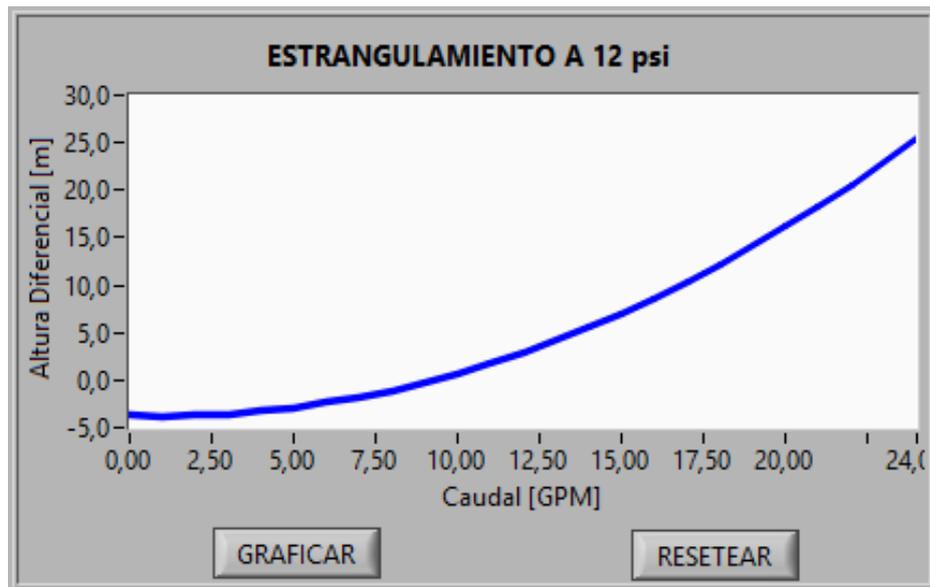


Figura 95 Curva característica de estrangulamiento a 12 psi

4.4.4. Curva característica por estrangulamiento a 9 psi

Se obtienen 14 datos para los vectores de flujo y presión diferencial para la curva característica por estrangulamiento de la válvula de control a 9 psi, es decir, válvula de control parcialmente cerrada como se muestra en la Tabla 21, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional, para cada valor de caudal que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la altura total.

Tabla 21

Vectores curva característica por estrangulamiento a 9 psi

Estrangulamiento a 9 psi	
[GPM]	[m]
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

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 22, el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva. El polinomio de la ecuación 4.11, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 96, en donde el flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = 0.157255x^2 - 0.416446x - 3.49134051 \quad (4.11)$$

Tabla 22

Vectores del Sub VI construcción curva por estrangulamiento

Estrangulamiento a 9 psi	
[GPM]	[m]
0	-3,49134
1	-3,75053
2	-3,69521
3	-3,32538
4	-2,64104
5	-1,64219
6	-0,328836
7	1,29903
8	3,24141
9	5,4983
10	8,0697
11	10,9556
12	14,156
13	17,671
14	21,5004
15	25,6443
16	30,1028
17	34,8758

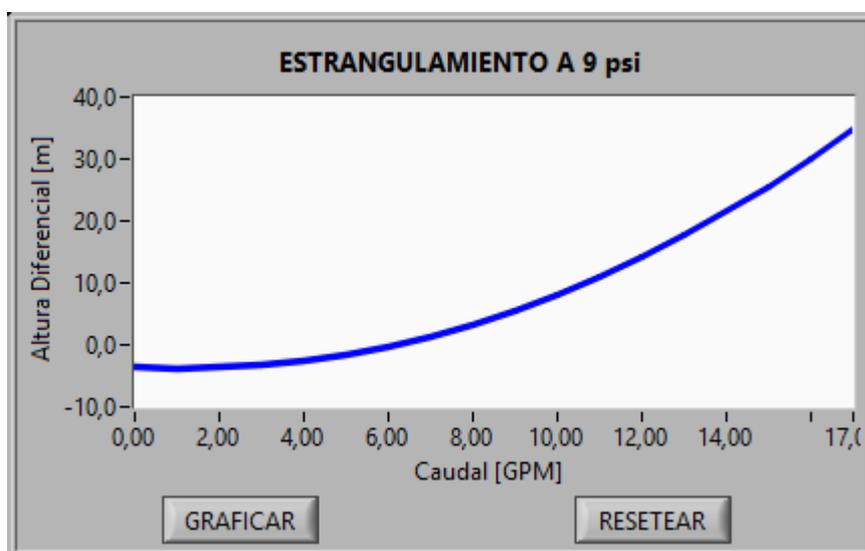


Figura 96 Curva característica de estrangulamiento a 9 psi

4.4.5. Curva característica por estrangulamiento a 6.5 psi

Se obtienen 10 datos para los vectores de flujo y presión diferencial para la curva característica por estrangulamiento de la válvula de control a 6.5 psi como se muestra en la Tabla 23, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional, para cada valor de caudal que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la altura total.

Tabla 23

Vectores curva característica por estrangulamiento a 6.5 psi

Estrangulamiento a 6,5 psi	
[GPM]	[m]
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

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 24, el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva. El polinomio de la ecuación 4.12, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 97, en donde el flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = 0.248264x^2 + 0.161686x - 3.74208493 \quad (4.12)$$

Tabla 24

Vectores del Sub VI construcción curva de estrangulamiento

Estrangulamiento a 6,5 psi	
[GPM]	[m]
0	-3,74208
1	-3,33213
2	-2,42566
3	-1,02265
4	0,876886
5	3,27295
6	6,16554
7	9,55466
8	13,4403
9	17,8225
10	22,7012
11	28,0764

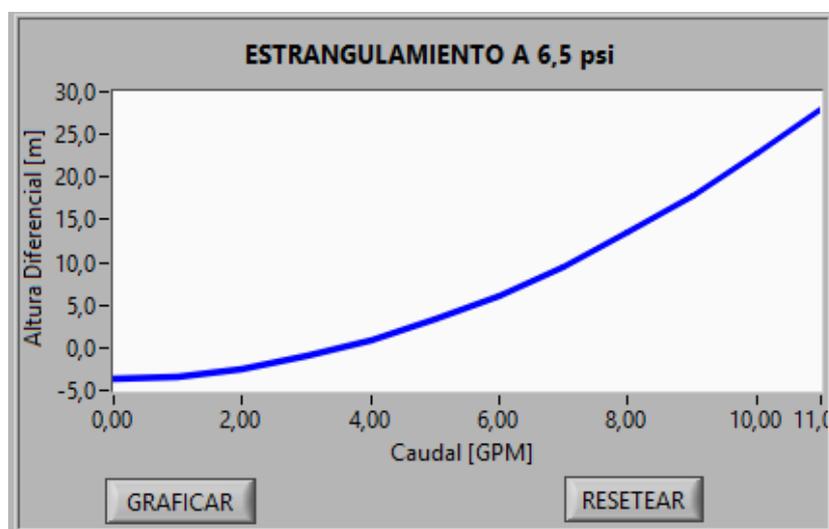


Figura 97 Curva característica de estrangulamiento a 6.5 psi

4.4.6. Curva característica por estrangulamiento a 5 psi

Se obtienen 7 datos para los vectores de flujo y presión diferencial para la curva característica por estrangulamiento de la válvula de control a 5 psi, es decir, válvula de control prácticamente cerrada como se muestra en la Tabla 25, mediante el control PID programado previamente en el PLC se da una variación de caudal de 1 GPM progresivamente en forma proporcional,

para cada valor de caudal que va circulando por la tubería se obtiene el valor de la altura total.

Tabla 25

Vectores curva característica por estrangulamiento a 5 psi

Estrangulamiento a 5 psi	
[GPM]	[m]
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

Al momento de utilizar el Sub VI de la construcción de la curva característica de la bomba se crean nuevos datos para los vectores de caudal y altura diferencial tal como se muestra en la Tabla 26, el mismo que genera las constantes del polinomio al cual se ajustan los datos de la curva. El polinomio de la ecuación 4.13, es evaluado, para posteriormente ser graficada la curva de la bomba como se muestra en la Figura 98, en donde el flujo en GPM se encuentra en el eje horizontal y la altura total en metros en el eje vertical.

$$f(x) = 0.590368x^2 + 0.418674x - 3.50994633 \quad (4.13)$$

Tabla 26

Vectores del Sub VI construcción curva por estrangulamiento

Estrangulamiento a 5 psi	
[GPM]	[m]
0	-3,50995
1	-2,5009
2	-0,311126
3	3,05939
4	7,61064
5	13,3426
6	20,2553
7	28,3488

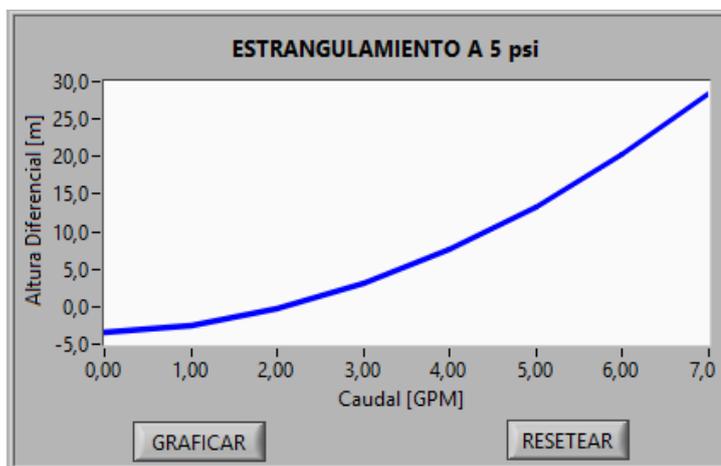


Figura 98 Curva característica de estrangulamiento a 6.5 psi

4.4.7. Puntos de operación curva de la bomba y curvas por estrangulamiento

En la Figura 99, se muestran las curvas de la bomba a una velocidad de operación constante de 60 Hz y las curvas características por estrangulamiento de la válvula de control, en la cual se puede notar que a medida que se cierra la válvula de control proporcional, disminuye el caudal y aumenta la presión diferencial, esto indica que la bomba consume energía prácticamente como si siempre estuviera trabajando al máximo de caudal que circula por la tubería.

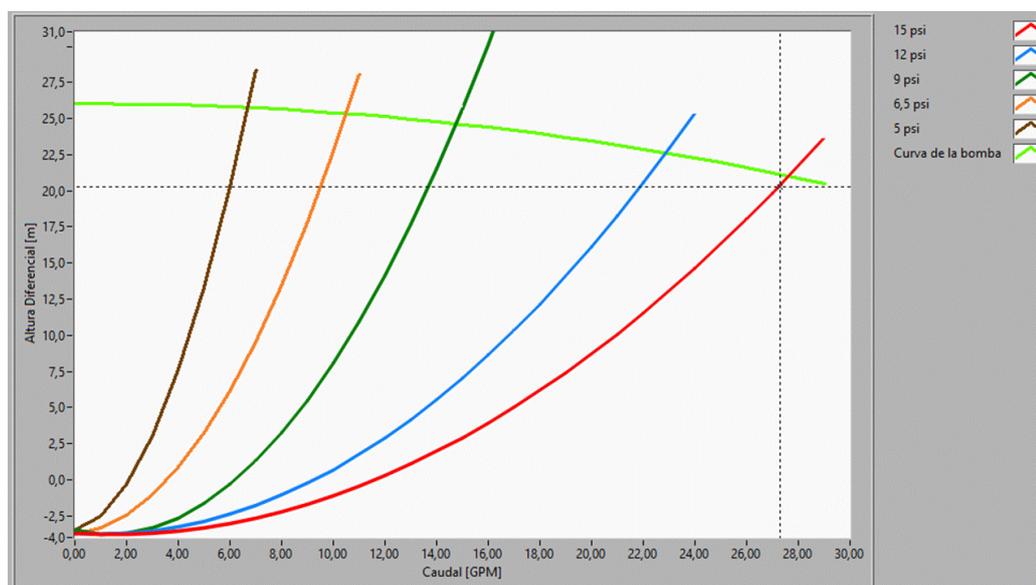


Figura 99 Curvas características del control por estrangulamiento

La curva característica por estrangulamiento indica que las pérdidas de carga de la válvula de control puesta en servicio en la impulsión se suman a la del resto del proceso, para estrangulamiento de la válvula de control proporcional se genera una curva diferente debido al cambio de caudal que circula por la tubería y la altura total del mismo.

Obtenidas las curvas de estrangulamiento y la curva de la bomba a velocidad de operación constante de 60 Hz, se puede encontrar el punto de operación el cual es la intersección entre las curvas de estrangulamiento y de la bomba, tal como se muestra en la Figura 100.

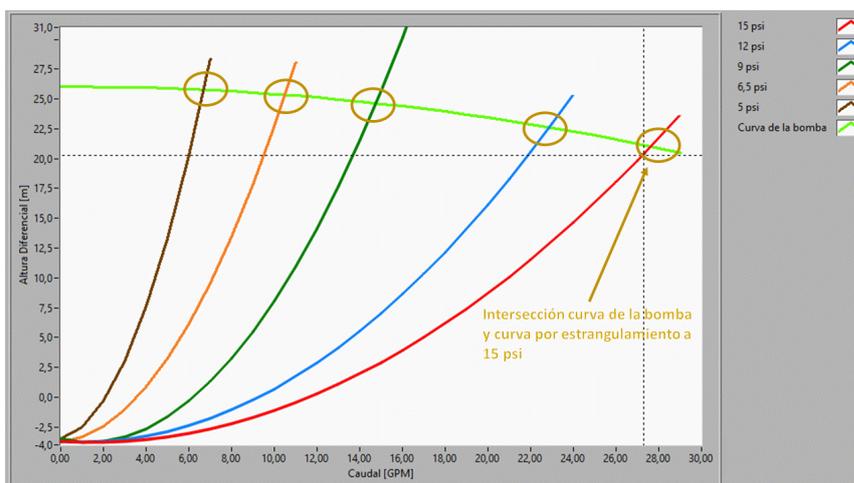


Figura 100 Puntos de operación por estrangulamiento

Sobre la curva de la bomba se tienen los distintos puntos de operación al variar la apertura de la válvula de control proporcional, de esta manera si se modifican las curvas de estrangulamiento, las intersecciones de las curvas se desplazan.

Los puntos de operación se determinan para saber donde existe una mayor eficiencia de funcionamiento de operación de la bomba centrífuga además de la energía consumida por la bomba a diferente estrangulamiento de la válvula de control proporcional como se observa en la Figura 101.

	Caudal		Altura		Potencia Hidráulica
OP 15 psi	27,6185	GPM	21,0147	m	359,08 W
OP 12 psi	22,872	GPM	22,6194	m	320,075 W
OP 9 psi	14,7652	GPM	24,6432	m	225,115 W
OP 6,5 psi	10,5033	GPM	25,3446	m	164,695 W
OP 5 psi	6,69557	GPM	25,7599	m	106,708 W

Figura 101 Datos puntos de operación por estrangulamiento

4.5. Comparación de la potencia consumida entre los métodos implementados.

Una vez implementados los métodos de control de caudal y al obtener los resultados pertinentes de los mismos, para realizar la comparación de la potencia consumida se procede a un análisis de los puntos de operación, es decir, las intersecciones de los controles determinadas por las curvas de la bomba y del sistema.

Al obtener distintos puntos de operación por modificación de las curvas a diferentes velocidades de operación y a diferente estrangulamiento de la válvula de control se obtiene una modificación de las tres variables importantes tomadas en cuenta en el proceso como son : flujo, presión diferencial y potencia, debido a esto para establecer una comparación de la potencia entre los métodos implementados es necesario hacerlo en un caudal similar entre ambos métodos, en la implementación del proceso se obtuvieron dos puntos de comparación energética, la primera como se observa en la Figura 102.

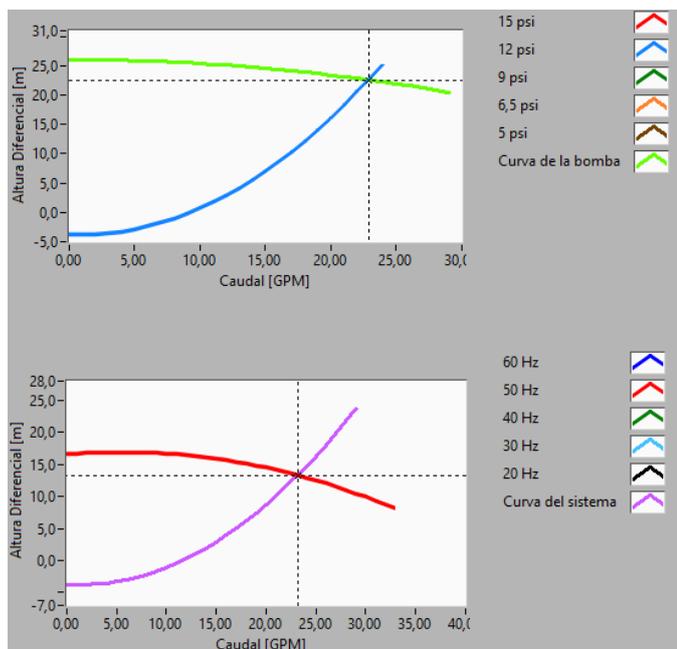


Figura 102 Comparación 1 potencia consumida

Los valores obtenidos para el método de estrangulamiento se observan en la Figura 103, mientras que los valores obtenidos en el método por variador de frecuencia se muestran en la Figura 104.

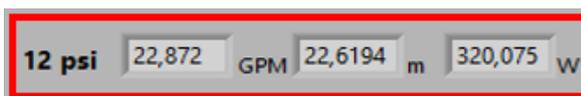


Figura 103 Punto de operación por estrangulamiento comparación 1

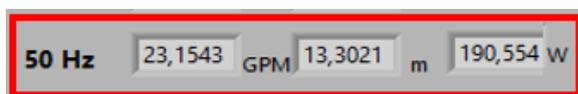


Figura 104 Punto de operación por variador comparación 1

Al aplicar el método de control de caudal por variador de frecuencia se demuestra que la potencia consumida es menor en 1.67971 veces con respecto al control por estrangulamiento con una potencia consumida de 190.554 W.

La segunda comparación energética se muestra en la Figura 105.

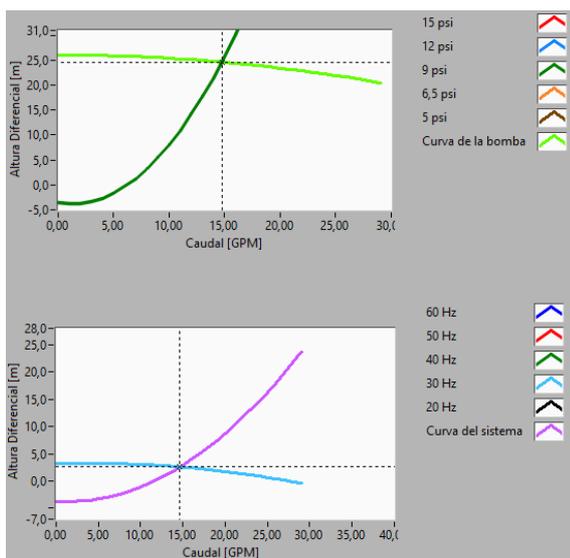


Figura 105 Comparación 2 potencia consumida

Los valores obtenidos para el método de estrangulamiento se observan en la Figura 106, mientras que los valores obtenidos en el método por variador de frecuencia se muestran en la Figura 107.

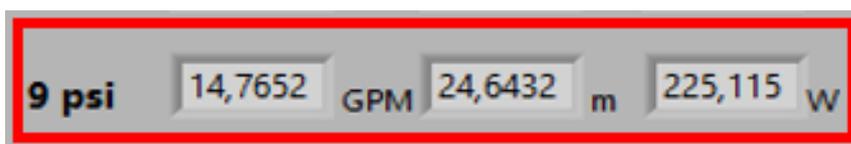


Figura 106 Punto de operación por estrangulamiento comparación 2

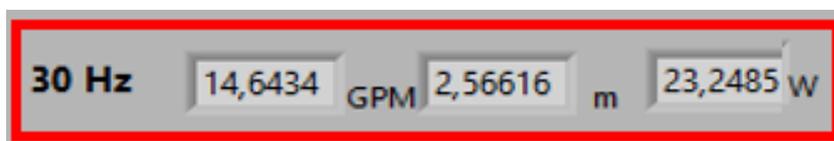


Figura 107 Punto de operación por variador comparación 2

Al aplicar el método de control de caudal por variador de frecuencia se demuestra que la potencia consumida es menor en 9.6830 veces con respecto al control por estrangulamiento con una potencia consumida de 23.2485 W.

4.6. Curvas de eficiencia de la bomba centrífuga

4.6.1. Curva de Eficiencia a 60 Hz

Para la obtención de la eficiencia de 60 Hz se realiza el cálculo de la eficiencia con los valores de caudal y altura diferencial presentes en el vector de 60 Hz, con los que se calcula la potencia hidráulica, la misma que es dividida para cada valor de potencia de entrada de la bomba en cada incremento de caudal como se muestra en la Tabla 27, que se obtuvo con ayuda del registrador de energía FLUKE 1735, como se muestra en la Figura 109, obteniendo así el vector de eficiencia tal como se muestra en la Tabla 28.

Tabla 27

Potencia de entrada a la bomba en 60 Hz

Potencia 60Hz	
[GPM]	[W]
0	533
1	544
2	558
3	569
4	579
5	584
6	593
7	602
8	609
9	622
10	633
11	641
12	651
13	662
14	684
15	726
16	737
17	750
18	756
19	785
20	809
21	819
22	833

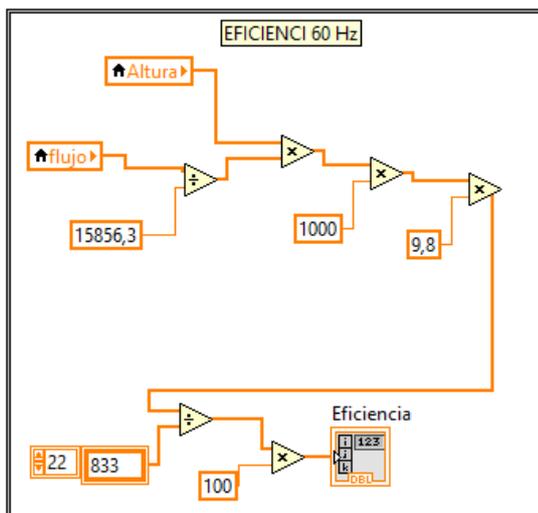


Figura 108 Cálculo de la eficiencia de 60Hz

Tabla 28

Vector obtenido de eficiencia a 60 Hz

Eficiencia 60 [%]
0,00938
3,01296
5,82216
8,50448
11,0759
13,5689
15,9052
18,1908
20,5778
22,6698
24,7013
26,951
28,9655
30,7385
31,8675
32,1384
32,582
33,7976
35,1103
35,4881
35,9545
36,3854
37,1153

Del vector de eficiencia obtenido, se realiza el ajuste de la curva para la obtención del polinomio de eficiencia, el mismo que se presenta en la ecuación 4.16, proporcionando así el nuevo vector de eficiencia tal como se muestra en la Tabla 29, el mismo que es evaluado y graficado como se puede observar en la Figura 109, a partir de cual se obtiene el valor máximo de eficiencia así como el valor de flujo en el que se da la eficiencia máxima.

$$f(x) = -0.0666291x^2 + 3.15395x - 0.283054342 \quad (4.16)$$

Tabla 29

Vector de eficiencia a 60 Hz generado por el ajuste de curvas

Eficiencia 60 Hz	
[GPM]	[%]
0	-0,283054
1	2,80526
2	5,75833
3	8,57913
4	11,2667
5	13,821
6	16,242
7	18,5298
8	20,6843
9	22,7055
10	24,5935
11	26,3483
12	27,9697
13	29,458
14	30,8129
15	32,0346
16	33,1231
17	34,0783
18	34,9002
19	35,5889
20	36,1443
21	36,5664
22	36,8553
23	37,011
24	37,0333
25	36,9225

Continúa 

26	36,6783
27	36,3009
28	35,7903
29	35,1464
30	34,3692
31	33,4588
32	32,4151

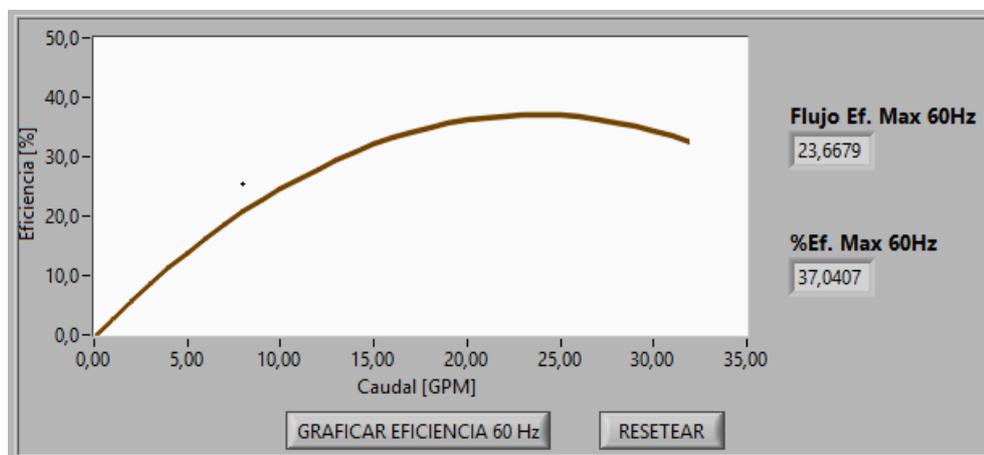


Figura 109 Curva de eficiencia a 60Hz

4.6.2. Curva de Eficiencia a 50 Hz

Para la obtención de la eficiencia de 50 Hz se realiza el cálculo de la eficiencia con los valores de caudal y altura diferencial presentes en el vector de 50 Hz, con los que se calcula la potencia hidráulica, la misma que es dividida para cada valor de potencia de entrada de la bomba en cada incremento de caudal como se muestra en la Tabla 30, que se obtuvo con ayuda del registrador de energía FLUKE 1735, como se muestra en la Figura 110, obteniendo así el vector de eficiencia tal como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 30

Potencia de entrada a la bomba en 50 Hz

Potencia 50Hz	
[GPM]	[W]
0	335
1	345

Continúa

2	351
3	357
4	364
5	369
6	375
7	383
8	389
9	397
10	404
11	413
12	419
13	430
14	462
15	469
16	488
17	498
18	505
19	510

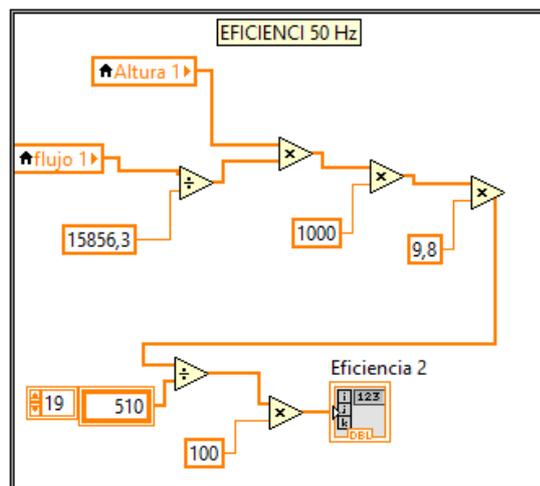


Figura 110 Cálculo de la eficiencia de 50Hz

Tabla 31

Vector obtenido de eficiencia a 50 Hz

Eficiencia 50 %
0,006493
3,04727
5,9253
8,72661
11,4674

Continúa

14,1701
16,7156
19,0868
21,356
23,4985
25,6354
27,4208
29,3173
30,8149
30,1199
31,2266
31,3364
32,517
33,196
34,2651

Del vector de eficiencia obtenido, se realiza el ajuste de la curva para la obtención del polinomio de eficiencia, el mismo que se presenta en la ecuación 4.17, proporcionando así el nuevo vector de eficiencia tal como se muestra en la Tabla 32, el mismo que es evaluado y graficado como se puede observar en la Figura 111 a partir de cual se obtiene el valor máximo de eficiencia así como el valor de flujo en el que se da la eficiencia máxima.

$$f(x) = -0.0852105x^2 + 3.40298x - 0.4474413 \quad (4.17)$$

Tabla 32

Vector de eficiencia a 50 Hz generado por el ajuste de curvas

Eficiencia 50 Hz	
[GPM]	[%]
0	-0,447441
1	2,87033
2	6,01769
3	8,99462
4	11,8011
5	14,4372
6	16,9029
7	19,1981
8	21,323
9	23,2774

Continúa 

10	25,0614
11	26,6749
12	28,1181
13	29,3908
14	30,4931
15	31,425
16	32,1864
17	32,7775
18	33,1981
19	33,4833
20	33,528
21	33,4374
22	33,1763
23	32,7448
24	32,1429
25	31,3706
26	30,4278
27	29,3147
28	28,0311
29	26,5771

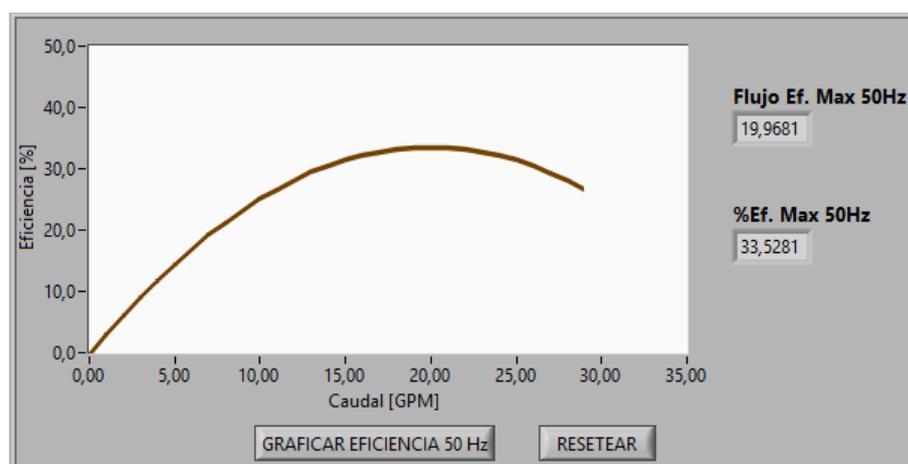


Figura 111 Curva de eficiencia a 50Hz

4.6.3. Curva de Eficiencia a 40 Hz

Para la obtención de la eficiencia de 40 Hz se realiza el cálculo de la eficiencia con los valores de caudal y altura diferencial presentes en el vector de 40 Hz, con los que se calcula la potencia hidráulica, la misma que es dividida para cada valor de potencia de entrada de la bomba en cada incremento de caudal como se muestra en la Tabla 33, que se obtuvo con

ayuda del registrador de energía FLUKE 1735, como se muestra en la Figura 112, obteniendo así el vector de eficiencia tal como se muestra en la Tabla 34.

Tabla 33

Potencia de entrada a la bomba en 40 Hz

Potencia 40Hz	
[GPM]	[W]
0	196
1	200
2	202
3	207
4	211
5	213
6	219
7	224
8	228
9	232
10	238
11	242
12	248
13	250
14	270
15	281
16	283

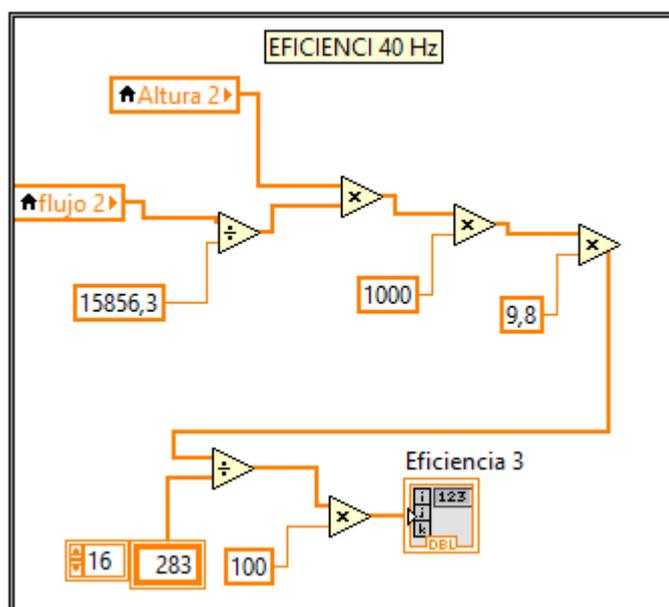


Figura 112 Cálculo de la eficiencia de 40Hz

Tabla 34**Vector obtenido de eficiencia a 40 Hz**

Eficiencia 40 %
0,00879
2,88074
5,62787
8,28015
10,8398
13,3763
15,6209
17,8076
19,8644
21,8707
23,4181
25,1957
26,4848
27,501
26,2618
26,6076
27,9691

Del vector de eficiencia obtenido, se realiza el ajuste de la curva para la obtención del polinomio de eficiencia, el mismo que se presenta en la ecuación 4.18, proporcionando así el nuevo vector de eficiencia tal como se muestra en la Tabla 35, el mismo que es evaluado y graficado como se puede observar en la Figura 113, a partir de cual se obtiene el valor máximo de eficiencia así como el valor de flujo en el que se da la eficiencia máxima.

$$f(x) = -0.097608x^2 + 3.35405x - 0.6270276 \quad (4.18)$$

Tabla 35**Vector de eficiencia a 40 Hz generado por el ajuste de curvas**

Eficiencia 40 Hz	
[GPM]	[%]
0	-0,627028
1	2,62941
2	5,69064
3	8,55664

Continúa 

4	11,2274
5	13,703
6	15,9834
7	18,0685
8	19,9584
9	21,6532
10	23,1526
11	24,4569
12	25,566
13	26,4798
14	27,1985
15	27,7219
16	28,0501
17	28,1831
18	28,1208
19	27,8634
20	27,4107
21	26,7628
22	25,9198
23	24,8814
24	23,6479
25	22,2192
26	20,5952
27	18,776
28	16,7616
29	14,552

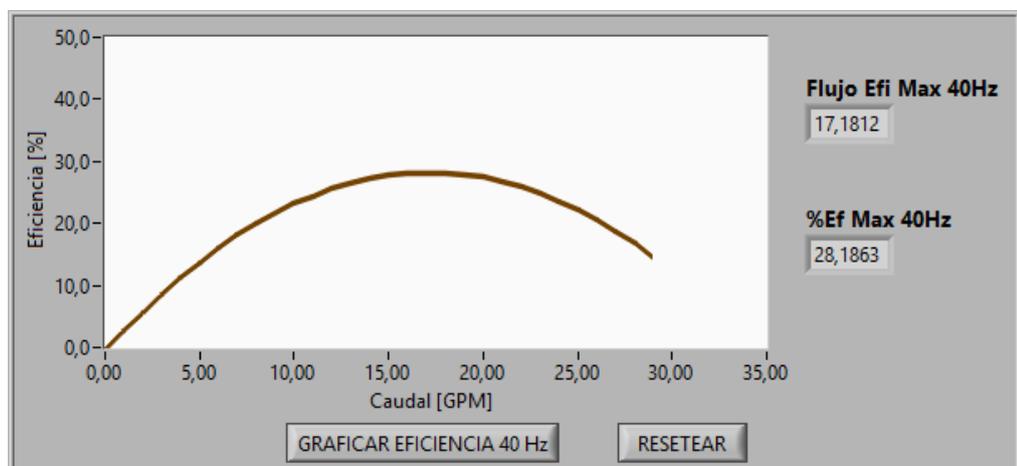


Figura 113 Curva de eficiencia a 40Hz

4.6.4. Curva de Eficiencia a 30 Hz

Para la obtención de la eficiencia de 40 Hz se realiza el cálculo de la eficiencia con los valores de caudal y altura diferencial presentes en el vector de 40 Hz, con los que se calcula la potencia hidráulica, la misma que es dividida para cada valor de potencia de entrada de la bomba en cada incremento de caudal como se muestra en la Tabla 36, que se obtuvo con ayuda del registrador de energía FLUKE 1735, como se muestra en la Figura 114, obteniendo así el vector de eficiencia tal como se muestra en la Tabla 37.

Tabla 36

Potencia de entrada a la bomba en 30 Hz

Potencia 30Hz	
[GPM]	[W]
0	103
1	106
2	109
3	111
4	114
5	115
6	118
7	122
8	123
9	126
10	128
11	130
12	133
13	136
14	138

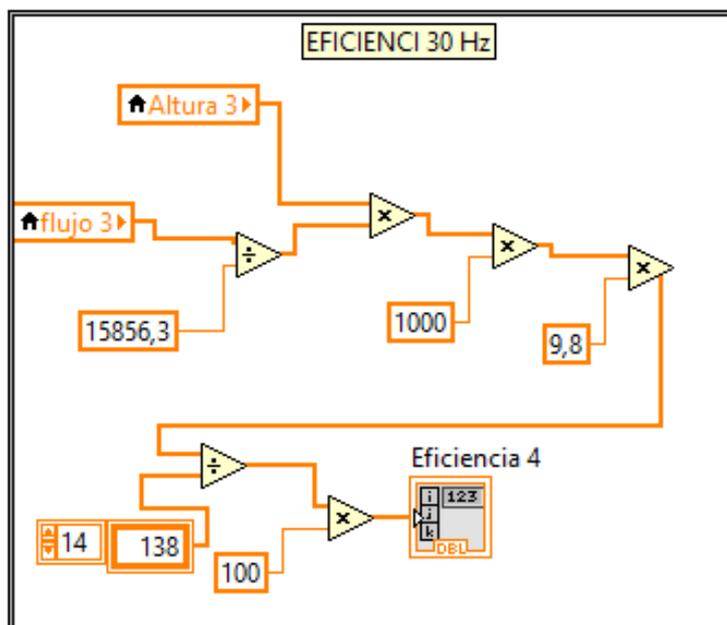


Figura 114 Cálculo de la eficiencia de 30Hz

Tabla 37

Vector obtenido de eficiencia a 30 Hz

Eficiencia 30 %
0,005965
1,90018
3,62633
5,45166
7,0727
8,88532
10,0338
11,3166
12,6505
13,7698
14,5581
15,4085
16,0102
16,3486
16,5054

Del vector de eficiencia obtenido, se realiza el ajuste de la curva para la obtención del polinomio de eficiencia, el mismo que se presenta en la ecuación 4.19, proporcionando así el nuevo vector de eficiencia tal como se muestra en la Tabla 38, el mismo que es evaluado y graficado como se puede observar

en la Figura 115, a partir de cual se obtiene el valor máximo de eficiencia así como el valor de flujo en el que se da la eficiencia máxima.

$$f(x) = -0.0645759x^2 + 2.1176x - 0.219868 \quad (4.19)$$

Tabla 38

Vector de eficiencia a 30 Hz generado por el ajuste de curvas

Eficiencia 30 Hz	
[GPM]	[%]
0	-0,219868
1	1,83315
2	3,75702
3	5,55173
4	7,2173
5	8,75371
6	10,161
7	11,4391
8	12,588
9	13,6078
10	14,4985
11	15,26
12	15,8923
13	16,3955
14	16,7696
15	17,0145
16	17,1302
17	17,1168
18	16,9743
19	16,7026
20	16,3017
21	15,7717
22	15,1125
23	14,3242
24	13,4067
25	12,3601
26	11,1843
27	9,8794
28	8,44532
29	6,88209



Figura 115 Curva de eficiencia a 30Hz

En la Figura 116 se presentan todas las curvas de eficiencia obtenidas a sus diferentes velocidades de operación, así como el porcentaje de eficiencia máxima y el flujo en el que alcanza dicho porcentaje en cada una de ellas.

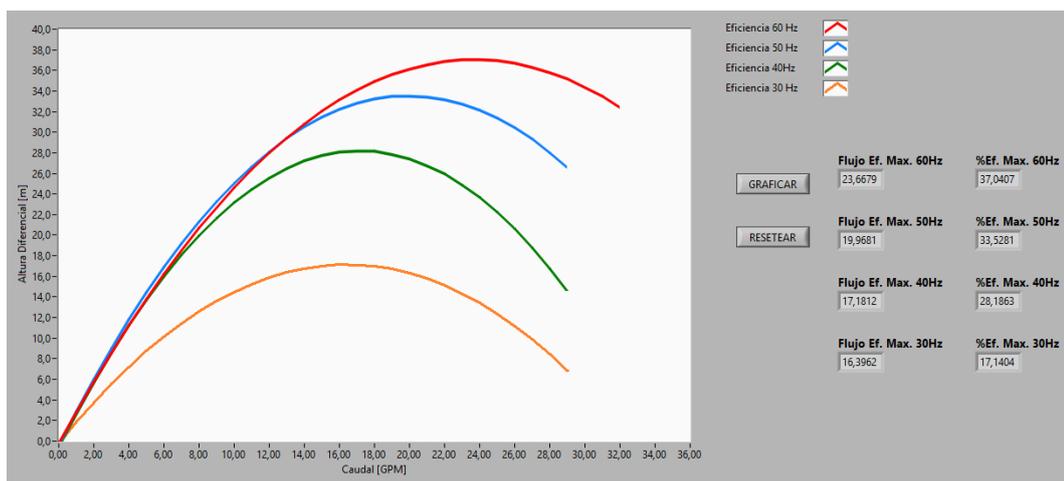


Figura 116 Eficiencia de la bomba centrífuga a diferentes velocidades

4.7. Alcances y Limitaciones

4.7.1. Alcances

El sistema de entrenamiento de bomba centrífuga, de acuerdo a su constitución y a las pruebas realizadas, presenta los siguientes 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.
- 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.

4.7.2. Limitaciones

El sistema de entrenamiento de bomba centrífuga, de acuerdo a su constitución y a las pruebas realizadas, presenta las siguientes 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.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. 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.
- 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 sólo 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.
- 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.

5.2. 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.
- 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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez Pulido, M. (2000). *Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR*. Barcelona: Marcombo.

Bartelt, T. (2006). *Instrumentation and Process Control*. Appleton: Cengage Learning.

Peña, J. (2003). *Introducción a los autómatas programables*. Cataluña: Editorial UOC.

Sánchez, J. A. (2006). *Instrumentación y Control Básico de Procesos*. Madrid: Ediciones Diaz de Santos.

Solé, A. C. (2012). *Instrumentación Industrial*. Barcelona: Marcombo.

Siemens. (2 de diciembre de 2016). *Industry Mall*. Recuperado el 2 de diciembre de 2016, Obtenido de Industry Mall: <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/WW/Catalog/Products/10045710>

Siemens. (19 de octubre de 2016). *Simatic KTP 600*. Recuperado el 19 de octubre de 2016, Obtenido de Simatic KTP 600: <http://www.conrad.com/ce/en/product/197884/Siemens-6AV6647-0AD11-3AX0-SIMATIC-KTP600-HMI-Basic-Panel-Resolution-320-x-240-pix-Interfaces-1-x-RS-485-1-x-RJ45-Eth>

Siemens. (2 de diciembre de 2016). *Simatic S7 - 1200*. Recuperado el 2 de diciembre de 2016, Obtenido de Siemens: http://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/controladores_modulares/controlador_basico_s71200/pages/s7-1200.aspx

Siemens. (18 de noviembre de 2016). *Sinamics G110*. Recuperado el 18 de noviembre de 2016, Obtenido de Industry Siemens:

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/910/20976910/att_109514/v1/G110_COM_1104_20976910_SP.pdf

UNAD. (11 de diciembre de 2016). *datateca*. Recuperado el 11 de diciembre de 2016, Obtenido de datateca: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccin_22_bombas_centrifugas.html

Emerson. (1 de diciembre de 2016). *Fisher™ 846 Electro-Pneumatic Transducer*. Recuperado el 1 de diciembre de 2016, Obtenido de Fisher™: <http://www.emerson.com/catalog/en-us/fisher-846>

Fischer, G. (17 de noviembre de 2016). *Signet 8450*. Recuperado el 17 de noviembre de 2016, Obtenido de GFPS: http://www.georgefischer.cz/wadm/spc_file_download.php?dl=dwn&f=506.pdf&h=388c5fa272&fn=8450-1_-_English.

Fischer, G. (22 de diciembre de 2016). *Signet 8550*. Recuperado el 22 de diciembre de 2016, Obtenido de GFPS: http://www.gfps.com/appgate/ecat/common_flow/100026/CH/en/4942/download/document.html.

Fischer, G. P. (1 de diciembre de 2016). *GF Piping Systems*. Recuperado el 1 de diciembre de 2016, Obtenido de GF Piping Systems: <http://www.gfps.com/>

FLUKE. (29 de enero de 2017). *FLUKE*. Recuperado el 29 de enero de 2017, Obtenido de Registrador trifasico 1735: <http://www.fluke.com/fluke/eces/medidores-de-calidad-de-la-energia-electrica/logging-power-meters/fluke-1735.htm?PID=56028>

Guillermo, M. R. (10 de noviembre de 2016). *e-Reding*. Recuperado el 10 de noviembre de 2016, Obtenido de e-Reding: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5091/{27/03/2015}>

Meter, B. (18 de diciembre de 2016). *Valves Positioners*. Recuperado el 18 de diciembre de 2016, Obtenido de Research Control: http://www.badgermeter.de/fileadmin/content/badgermeter/media/produkte/Control_valves/RCV/RC-Serie_RECO/Stellungsregler/BLRA_TLDA/RCV_BLRA-TLDA_BA_02_1247.pdf

ANEXOS



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por **PABLO JOSE SALAZAR VILLACÍS** y **MARCELO JAVIER SILVA SALINAS**.

En la ciudad de Latacunga, a los 18 días del mes de mayo del 2017 bajo la supervisión de.



Ing. Edwin Pruna
DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:



Ing. Franklin Silva Monteros
DIRECTOR DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO