



ESPE

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

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN.**

**TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE
CAUDAL Y PUESTA EN SERVICIO DE UN TRANSMISOR
MAGNÉTICO DE FLUJO, PARA EL MONITOREO Y CONTROL
AUTOMÁTICO DE LA VARIABLE CAUDAL, EN EL
LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE
PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS
ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”**

**AUTORES: CHRISTIAN PATRICIO CARVAJAL CABRERA
LUIS ENRIQUE PROAÑO ALOMALIZA**

DIRECTOR: ING. EDWIN PRUNA.

CODIRECTOR: ING. MARCO PILATÁSIG.

LATACUNGA

2015



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

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el trabajo de titulación, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE CAUDAL Y PUESTA EN SERVICIO DE UN TRANSMISOR MAGNÉTICO DE FLUJO, PARA EL MONITOREO Y CONTROL AUTOMÁTICO DE LA VARIABLE CAUDAL, EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA” realizado por los señores **Christian Patricio Carvajal Cabrera** y **Luis Enrique Proaño Alomaliza**, 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 Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **Christian Patricio Carvajal Cabrera** y **Luis Enrique Proaño Alomaliza** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 23 de noviembre del 2015

Ing. Edwin Pruna

DIRECTOR

Ing. Marco Pilatásig

CODIRECTOR



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Christian Patricio Carvajal Cabrera**, con cédula de identidad N°1804365383, y **Luis Enrique Proaño Alomaliza** con cédula de identidad N°1804710356, declaramos que este trabajo de titulación "**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE CAUDAL Y PUESTA EN SERVICIO DE UN TRANSMISOR MAGNÉTICO DE FLUJO, PARA EL MONITOREO Y CONTROL AUTOMÁTICO DE LA VARIABLE CAUDAL, EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA**" 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, 23 de noviembre del 2015

Christian Patricio Carvajal Cabrera

C.C.:1804365383

Luis Enrique Proaño Alomaliza

C.C.:1804710356



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

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Christian Patricio Carvajal Cabrera** y **Luis Enrique Proaño Alomaliza**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE CAUDAL Y PUESTA EN SERVICIO DE UN TRANSMISOR MAGNÉTICO DE FLUJO, PARA EL MONITOREO Y CONTROL AUTOMÁTICO DE LA VARIABLE CAUDAL, EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 23 de noviembre del 2015

Christian Patricio Carvajal Cabrera

C.C.:1804365383

Luis Enrique Proaño Alomaliza

C.C.: 1804710356

DEDICATORIA

Con amor y cariño dedico este trabajo a Dios, por haberme dado la vida y permitir llegar a cumplir este objetivo profesional. A mis padres, por ser las personas que siempre están a mi lado brindándome incondicionalmente su amor y apoyo. A mi hermano y novia, por compartir buenos y malos momentos brindándome siempre palabras para seguir adelante. A mis familiares, puesto que nunca ha faltado palabras de apoyo para poder culminar una etapa importante de mi vida.

Luis.

Dedico este trabajo con todo mi amor y cariño a mis padres, por ser las personas que me brindaron todo el apoyo y las fuerzas necesarias para salir adelante, inculcarme valores y permitirme cumplir una meta más en mi vida, a mi hermano por apoyarme y estar conmigo en las buenas y en las malas y por ser un pilar fundamental en mi formación personal.

Christian.

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradecemos a Dios por brindarnos la salud y la vida, por ser el apoyo incondicional y permitirnos conocer a personas extraordinarias. A nuestros padres, por darnos su apoyo en los buenos y malos momentos con palabras que edifican tanto como personas y profesionales. A nuestros hermanos por ser los mejores amigos y estar en cada momento de nuestras vidas.

Así mismo a todos los docentes de nuestra carrera quienes con su paciencia, conocimientos y respeto han logrado inculcar valores y experiencias para la vida profesional, con un agradecimiento especial para los tutores de la tesis Ing. Edwin Pruna e Ing. Marco Pilatásig por haber compartido su amistad.

Christian Carvajal y

Luis Proaño

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
CERTIFICADO	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. Descripción del problema	1
1.2. Importancia	2
1.3. Introducción	2
1.4. Variable caudal	3
1.5. Unidades de medición de caudal	3
1.5.1. Caudal volumétrico	3
1.5.2. Caudal másico	4
1.5.3. Densidad de caudal másico	4
1.5.4. Métodos para medir caudal	4
1.6. Transmisor Rosemount 8732e	6
1.6.1. Principio del transmisor 8732e	6
1.6.2. Transmisor Rosemount 8732E (AC)	6
1.6.3. Consumo de potencia del transmisor	7
1.6.4. Instalación del transmisor Rosemount 8732E	7
1.6.5. Materiales necesarios para la instalación del transmisor	8
1.6.6. Configuración del transmisor 8732E	12
1.6.7. Interfaz local del operador	13
1.6.8. Características básicas del LOI	13
1.6.9. Introducción de datos	14
1.6.10. Acceder a estructuras de menú	14
1.6.11. Mensajes de diagnóstico	16

1.7.	Variador Delta	16
1.7.1.	Modelos y etiquetas de los variadores Delta serie VFD-E	17
1.7.2.	VariadorDelta VFD004E23A	19
1.8.	Bomba centrífuga.....	22
1.8.1.	Clasificación.....	23
1.8.2.	Ventajas de las bombas centrífugas	23
1.8.3.	Capacidad de trabajo de una bomba centrífuga	23
1.8.4.	Funcionamiento	24
1.8.5.	Cavitación	24
1.9.	Controlador lógico programable.....	26
1.9.1.	PLC SIEMENS S7-1500	27
1.9.2.	Características del PLC S7-1500.....	28
1.9.3.	Módulos de entradas y salidas analógicas.....	30
1.9.4.	Módulo de entradas analógicas AI 8 x U/I/RTD/TC ST	30
1.9.5.	Módulo de salidas analógicas AQ 4 x U/I ST	31
1.9.6.	Fuente de alimentación, 24 V DC / 8 A (SIPLUS PM 1507).....	31
1.9.7.	Comunicación Profibus	32
1.9.8.	Comunicación Ethernet.....	33
1.10.	Pantalla SIEMENS KTP-600 basic color.....	33
1.11.	Tarjeta de adquisición de datos NI MYDAQ.....	35
1.12.	Control automático de procesos	37
1.13.	Estrategias de control	38
1.13.1.	Control PID	39
1.13.2.	Control difuso.....	40
1.13.3.	Control predictivo	43
1.13.4.	Modelo de predicción	44
1.13.5.	Función objetivo	45
1.13.6.	Ley de control	46
1.14.	LABVIEW	46
1.15.	TIA PORTAL.....	47
1.16.	MATLAB.....	49
1.16.1.	Identificación de modelos lineales	50

CAPÍTULO II

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN DE FLUJO

2.1.	Introducción	51
2.2.	Especificación de requisitos del sistema.....	51
2.3.	Diagrama del panel frontal.....	52
2.4.	Diagrama de bloques, flujo y P&ID del sistema	52
2.4.1.	Diagrama de bloques	52
2.4.2.	Diagrama P&ID	54
2.4.3.	Diagrama de flujo	56
2.4.4.	Diagrama de flujo del HMI.....	57
2.4.5.	Diagrama de flujo en LABVIEW	57
2.5.	Instalación del transmisor magnético de flujo Rosemount 8732E ...	58
2.5.1.	Ubicación del transmisor Rosemount 8732E	58
2.5.2.	Instalación tipo brida	60
2.6.	Diagrama e instalación eléctrica del panel de la estación.....	62
2.6.1.	Elementos que intervienen en el panel	62
2.7.	Conexión de entradas y salidas analógicas del PLC S7-1500.....	64
2.7.1.	Conexión de la entrada analógica de corriente	64
2.7.2.	Conexión de la salida analógica de voltaje	65
2.8.	Programación y configuración del PLC y la TOUCH PANEL.....	66
2.8.1.	Programación del PLC	66
2.8.2.	Creación de un nuevo proyecto en el TIA PORTAL.....	66
2.8.3.	Agregar y configurar un dispositivo	67
2.8.4.	Selección de los módulos del PLC.....	68
2.8.5.	Configuración de la interfaz Profinet del controlador	69
2.8.6.	Configuración de los módulos de entradas y salidas	70
2.8.7.	Cargar la configuración en la CPU del PLC	74
2.9.	Programación del PID en PLC SIEMENS S7-1500	75
2.9.1.	Descripción de bloque “MAIN [OB1]”	75
2.9.2.	Creación de variables del programa	76
2.9.3.	Creación del objeto tecnológico	78
2.9.4.	Configuración de los parámetros del PID.....	80
2.9.5.	Cargar el programa en la CPU del PLC S7-1500	82
2.10.	Configuración de la TOUCH PANEL.....	83
2.11.	Conexión con el PLC.	84

2.12.	Crear objetos de entrada y salida de una variable	85
2.13.	Programación de los controladores en LABVIEW.....	87
2.13.1.	Función de transferencia de la estación de caudal	87
2.13.2.	Adquisición de datos con la NI- MYDAQ.....	93
2.13.3.	Control PID en LABVIEW.....	95
2.13.4.	Control difuso en LABVIEW	96
2.13.5.	Control predictivo MPC en LABVIEW	102

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.1.	Introducción	106
3.2.	Conexiones previas de la estación de caudal.....	107
3.3.	Pruebas experimentales	107
3.3.1.	Prueba del transmisor	108
3.3.2.	Transmisor magnético de flujo 8732E	108
3.4.	Módulo de salidas analógicas AQ 4XU/I ST	108
3.5.	Módulo de entradas analógicas AI 8XU/I/RTD/TC ST	109
3.6.	Variador de frecuencia Delta	109
3.7.	Descripción de los privilegios por usuarios	109
3.7.1.	Pasos para ingresar a los diferentes tipos de usuarios.....	110
3.8.	Acceso y descripción de los controles PLC S7-1500.....	111
3.9.	Análisis de las curvas del proceso	114
3.9.1.	Control proporcional.....	116
3.9.2.	Control proporcional integral	117
3.9.3.	Control proporcional integral derivativo PID	119
3.10.	Pantalla del proceso	120
3.11.	Avisos del HMI	121
3.12.	Funcionamiento de los controles con labview.....	121
3.12.1.	Control proporcional integral derivativo.....	122
3.12.2.	Control lógico difuso	127
3.12.3.	Control predictivo	128
3.12.4.	Análisis comparativo de los controladores	129
3.13.	Alcances y limitaciones	131
3.13.1.	Alcances	131
3.13.2.	Limitaciones	132

CAPÍTULO IV**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

4.1.	Conclusiones	134
4.1.1.	Módulo didáctico	134
4.1.2.	Controles.....	135
4.2.	Recomendaciones	137

BIBLIOGRAFÍA	139
---------------------------	------------

LINKOGRAFÍA	139
--------------------------	------------

ANEXOS.....	142
--------------------	------------

ANEXO A: GLOSARIO DE TÉRMINOS

ANEXO B: HOJAS DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Plano dimensional ROSEMOUNT 8732E.....	7
Figura 2	Conexiones de alimentación de CA del Transmisor	10
Figura 3	Cableado de campo del transmisor ROSEMOUNT 8732	12
Figura 4	Conexiones de la señal del FIELDBUS FOUNDATION	12
Figura 5	Estructura de los menús de la interfaz local del operador	13
Figura 6	Teclado de la interfaz local del operador	14
Figura 7	Variadores delta series VFD-E	17
Figura 8	Modelo del variador referenciado con etiqueta.....	18
Figura 9	Serie de un variador y su explicación detallada.....	18
Figura 10	Estructura interna del variador delta VFD004E23A	19
Figura 11	Terminales de conexión del variador Delta	20
Figura 12	Conexión del circuito principal	22
Figura 13	Bomba centrífuga, disposición, esquema y perspectiva	24
Figura 14	Efecto de la cavitación en la capacidad de la bomba	25
Figura 15	Diagrama de bloques para un proceso controlado por PLC.....	27
Figura 16	Configuración de un sistema de automatización S7-1500.....	28
Figura 17	Funciones de la pantalla PLC 1500.....	30
Figura 18	Comunicación PROFIBUS y ETHERNET.....	33
Figura 19	TOUCH KTP-600 PN	34
Figura 20	Ni MYDAQ.....	35
Figura 21	Partes del sistema DAQ.....	36
Figura 22	Terminal de conexión	36
Figura 23	Diagrama del Control automático de Procesos.....	37
Figura 24	Lazo de Control Cerrado PID.....	39
Figura 25	Partes que conforman al controlador difuso.....	41
Figura 26	Controlador Difuso en un control convencional	41
Figura 27	Idea del control Predictivo MPC	44
Figura 28	Horizonte de Control y Predicción.....	45
Figura 29	Software TIA	48
Figura 30	Visión General del Alcance SIMATIC	49
Figura 31	Comando Ident de MATLAB.	50
Figura 32	Diagrama del panel Frontal	52
Figura 33	Diagrama de Bloques de la Estación.....	53
Figura 34	Diagrama P&ID de la Estación	54
Figura 35	Diagrama de flujo de la estación	56
Figura 36	Diagrama de flujo del HMI	57
Figura 37	Diagrama de flujo LabVIEW	58
Figura 38	Instalación del transmisor 8732 E en la Estación de Flujo.....	59
Figura 39	Posiciones correctas de instalación del Transmisor	59
Figura 40	Posición horizontal de estación	60
Figura 41	Instalación del sensor con la junta	60
Figura 42	Elementos del panel de control	62
Figura 43	Conexión de la entrada analógica de corriente.....	65
Figura 44	Conexión de la salida analógica de voltaje.....	65
Figura 45	Ejecución del software TIA PORTA V12.....	66
Figura 46	Ventana para crear un nuevo proyecto	67

Figura 47	Agregar un dispositivo.....	67
Figura 48	Selección de la CPU del controlador	68
Figura 49	Selección de módulos del PLC.....	69
Figura 50	Acceso a las propiedades de la interfaz PROFINET	69
Figura 51	Propiedades de la interfaz PROFINET	70
Figura 52	Acceso a la configuración del módulo de salidas analógicas.....	71
Figura 53	Propiedades generales del módulo de salida analógica	71
Figura 54	Dirección inicial del dato de salida	72
Figura 55	Acceso a la configuración del módulo de entradas analógicas.....	72
Figura 56	Propiedades generales del módulo de entradas analógicas	73
Figura 57	Dirección inicial del dato de salida	73
Figura 58	Cargar configuración en el dispositivo.....	74
Figura 59	Estado de los módulos asociados a la CPU.....	74
Figura 60	Árbol del proyecto	75
Figura 61	Ventana de programación Main [OB1]	75
Figura 62	Acceso a la tabla de variables	76
Figura 63	Tabla de variables	77
Figura 64	Escalada de la entrada en LPM.....	77
Figura 65	Agregar el objeto tecnológico	78
Figura 66	Objeto tecnológico PID	79
Figura 67	Variables de entrada al bloque del PID	79
Figura 68	Acceso a la ventana de configuración de bloque PID	80
Figura 69	Selección del tipo de regulación.....	80
Figura 70	Parámetros de entrada/salida.....	81
Figura 71	Límites del valor real	81
Figura 72	Escala del valor real de entrada.....	81
Figura 73	Configuración del Valor de salida.....	82
Figura 74	Compilación del programa.....	82
Figura 75	Cargar el programa en el PLC.....	83
Figura 76	Agregar nuevo dispositivo	84
Figura 77	Selección del dispositivo para el HMI	84
Figura 78	Selección de la CPU para la conexión con el HMI	85
Figura 79	Añadir un campo de entrada/salida de un dato	86
Figura 80	Asignación del bloque a una variable del PLC.....	86
Figura 81	Agregar un botón	87
Figura 82	Configuración de las propiedades del botón	87
Figura 83	Respuesta de la salida frente al cambio de entrada	88
Figura 84	Creación de una nueva variable en MATLAB	88
Figura 85	Asignar valores a la variable ENTRADA.....	89
Figura 86	Asignar valores a la variable SALIDA.....	89
Figura 87	Importación de datos a la función ident de MATLAB.....	90
Figura 88	Cálculo de la función de transferencia en el matriz de estados	91
Figura 89	Porcentajes de similitud de la función de transferencia.....	91
Figura 90	Gráficas de las FT: a) Dominio s, b) Matriz de estados.....	92
Figura 91	Crear un nuevo proyecto LabVIEW	93
Figura 92	Creación de un nuevo VI dentro del Proyecto.....	93
Figura 93	Creación de la variable compartida “ENTRADA”	94
Figura 94	Configuración de la variable compartida “ENTRADA”	94

Figura 95	Programa de adquisición de corriente con la NI MYDAQ	95
Figura 96	Variable compartida para el programa del PID	96
Figura 97	Icono PID.....	96
Figura 98	Estructura general de un sistema de lógica difusa.....	97
Figura 99	Creación de un nuevo VI	97
Figura 100	Selección del asistente del Control Difuso	98
Figura 101	Ventana del asistente del Control Difuso.....	98
Figura 102	Selección de la entrada y salida de la estrategia de control.....	99
Figura 103	Creación de los conjuntos difusos	99
Figura 104	Funciones membresía para la entrada del controlador	100
Figura 105	Funciones de membresía de la variable salida.....	100
Figura 106	Reglas para el control Difuso.....	101
Figura 107	Bloque del control Difuso en LabVIEW	102
Figura 108	Herramientas del control MPC en LabVIEW	102
Figura 109	CD CREATE MPC CONTROLLER.....	103
Figura 110	CD IMPLEMENT MPC CONTROLLER.....	104
Figura 111	CD SET MPC CONTROLLER	105
Figura 112	CD UPDATE MPC WINDOWS.....	105
Figura 113	Estación de Caudal	106
Figura 114	Conexiones previas	107
Figura 115	Ingreso al usuario "ADMINISTRADOR"	110
Figura 116	Menú del Proceso.....	110
Figura 117	Selección del control (P).....	112
Figura 118	Selección del control (PI).....	113
Figura 119	Selección del control (PID).....	114
Figura 120	Selección de las "TENDENCIAS".....	115
Figura 121	Pantalla de las TENDENCIAS del Proceso.....	116
Figura 122	Tendencia del proceso con un valor de $K_p=3$	117
Figura 123	Tendencia ante una perturbación en el proceso.....	117
Figura 124	Tendencia del proceso con $K_p=1,0010$ y $T_i=2.4300$	118
Figura 125	Cuerva de respuesta del proceso ante una perturbación	119
Figura 126	Tendencias del proceso con $K_p=1.001$, $T_i=2,43$ y $T_d=0,014$	120
Figura 127	Cueva de reacción del proceso frente a una perturbación	120
Figura 128	Pantalla del "PROCESO".....	121
Figura 129	Pantalla de Históricos del proceso.....	121
Figura 130	Función de transferencia ingresada en MATLAB.....	124
Figura 131	Icono del PID Tuning de MATLAB	124
Figura 132	Pantalla del PID Tuning	124
Figura 133	Cargar una nueva variable en PID Tuning.....	125
Figura 134	(a) "Form" constantes, (b) "Type" sintonizar.....	126
Figura 135	Variable de control (CV) generada por PID.....	127
Figura 136	Resultados del controlador PID.....	127
Figura 137	Variable de control (CV) generada por el Difuso	128
Figura 138	Resultados del controlador Difuso	128
Figura 139	Variable de control (CV) generada por el MPC.....	129
Figura 140	Resultados del controlador MPC.....	129
Figura 141	Variable de control (CV) PID, DIFUSO y MPC	130
Figura 142	Resultados de los controladores PID, DIFUSO y MPC	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Formas de Medición de Caudal.....	5
Tabla 2	Formas de Medición de Caudal.....	7
Tabla 3	Montaje del Transmisor 8732E.....	8
Tabla 4	Valores de fusibles de acuerdo a la alimentación.....	9
Tabla 5	Especificaciones para el cableado del FIELDBUS.....	10
Tabla 6	Pasos para cambiar la configuración del Transmisor	15
Tabla 7	Mensajes de diagnóstico del Transmisor.....	16
Tabla 8	Mensajes de error del Transmisor.....	16
Tabla 9	Rango de suministro eléctrico.....	18
Tabla 10	Estructuras del variador Delta (A y B)	20
Tabla 11	Condiciones Ambientales del Variador de Frecuencia	21
Tabla 12	Tipos de bombas centrifugas	23
Tabla 13	Características de configuración del PLC S7-1500.....	28
Tabla 14	Características del sistema de conexión.....	29
Tabla 15	Características del Módulo de entradas analógicas.....	30
Tabla 16	Características del Módulo de salidas analógicas.....	31
Tabla 17	Características de la fuente monofásica PM 1507	32
Tabla 18	Características KTP-600 PN	34
Tabla 19	Acciones de las constantes del Controlador PID.....	40
Tabla 20	Características de LabVIEW	47
Tabla 21	Pasos de instalación del transmisor tipo brida	61
Tabla 22	Datos de las variables con los que trabaja el boque PID	79
Tabla 23	Reglas difusas del controlador.....	101
Tabla 24	Pruebas del transmisor de flujo 8732E.....	108
Tabla 25	Valores de prueba para el control proporcional.	116
Tabla 26	Valores de prueba para sintonizar el control PI	118
Tabla 27	Pruebas para sintonizar el control PID	119
Tabla 28	Cambios del valor de consigna (SP).....	122
Tabla 29	Fórmulas para las constantes del PID.....	123
Tabla 30	Constantes del controlador PID.....	126
Tabla 31	Comparación de los controles PID, DIFUSO, MPC	131

RESUMEN

Este trabajo se centra en el diseño e implementación de un módulo didáctico que realiza el monitoreo y control automático del caudal, el sistema controla el flujo de agua que circula por la tubería, por medio de un controlador el cual recibe la señal del transmisor magnético de flujo Rosemount 8732E, la información es procesada de acuerdo a los controladores PID, Lógica Difusa o Predictivo previamente programados y analizados mediante la función de transferencia de la estación obtenida mediante el software Matlab. Para seleccionar el tipo de control tradicional P, PI, PID se realiza mediante la TOUCH SCREEN, los demás controles se los asigna y ejecuta directo desde la PC, esto permite analizar las ventajas y desventajas de las estrategias de control en procesos industriales, el controlador envía la señal eléctrica hacia el variador de frecuencia, el mismo que se encarga de alterar la velocidad de la bomba centrífuga, consiguiendo así modificar el flujo de líquido que atraviesa por la tubería, esta variación será observada tanto en el transmisor como en el rotámetro, además mediante la TOUCH u ordenador se puede visualizar el proceso en su totalidad, cambiar el valor de consigna de la variable, definir rangos de alarma, se adicionará niveles de usuario, un registro de eventos y observar históricos de la variable. Además consta de un HMI realizado en la pantalla TOUCH la cual muestra el comportamiento del proceso y de las variables más importantes de la planta como: la variable de control (CV), de proceso (PV) y valor de consigna (SP). Se implementan algoritmos de control capaces de mantener al proceso con un funcionamiento óptimo, para el control mediante las herramientas ya establecidas en el software TIA y LabVIEW, se deja la posibilidad de implementar en la planta controladores clásicos y avanzados como redes neuronales.

PALABRAS CLAVE:

- **HMI**
- **CONTROL PREDICTIVO**
- **PID (PROPORCIONAL INTEGRAL Y DERIVATIVO)**
- **CONTROL DIFUSO**

ABSTRACT

This work focuses on the design and implementation of a training module that performs the automatic control and monitoring the flow, the system controls the flow of water flowing through the pipe, by means of a controller which receives the signal from the magnetic transmitter Rosemount 8732E flow, the information is processed according to PID, fuzzy logic controllers or Predictive pre-programmed and analyzed using the transfer function of the station obtained by the Matlab software. To select the type of traditional control P, PI, PID is performed by TOUCH SCREEN, other controls are assigned and executed directly from the PC, this allows to analyze the advantages and disadvantages of control strategies in industrial processes, the controller sends the electric signal to the inverter, the same that is responsible for altering the speed of the centrifugal pump, thus modifying the flow of liquid passing through the pipe, this variation will be noted in both the transmitter and the flowmeter, also by TOUCH or computer you can display the entire process, change the Set Point of the variable, define ranges of alarm, user levels, an event log will be added and historical observed variable. Also it includes an HMI made in the TOUCH SCREEN which shows the behavior of the process and of the most important variables of the plant as the control variable (CV), process (PV) value and get (SP). Control algorithms able to keep the process with optimal performance, control using the tools already established in the TIA and LabVIEW software, the possibility of implementing the classics as neural networks and advanced controllers are implemented plant leaves.

KEYWORDS:

- **HMI**
- **PREDICTIVE CONTROL**
- **PID (PROPORTIONAL INTEGRAL AND DERIVATIVE)**
- **FUZZY CONTROL**

CAPÍTULO I

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. Descripción del problema

En la actualidad el sector industrial han migrado a procesos automatizados para mantener variables dinámicas en rangos establecidos con el propósito de obtener un producto final en buen estado y proteger tanto al operador y maquinaria; es indispensable conocer las ventajas, desventajas y características de los diferentes métodos de control.

Debido al comportamiento de cada proceso industrial no es factible el uso de un solo controlador: el controlador PID es utilizado en la mayoría de procesos industriales por su gran desempeño en sistemas lineales. El control Difuso posee un algoritmo basado en niveles jerárquicos, similares al pensamiento humano posee una buena funcionalidad en procesos rápidos, mientras que el Modelo Predictivo es un método de control que ha ingresado en los últimos años en la industria como la mejor opción para controlar un proceso con múltiples entradas y múltiples salidas.

Al realizar el control de variables dinámicas no comunes tales como el caudal, es necesario la implementación de un método de control más robusto y avanzado, ya que en estos procesos existe varios factores que intervienen en la variable, por ejemplo la fluctuación del caudal, la presión que se ejerce en la tubería, etc.

Para la aplicación de los controladores es necesario la construcción de la planta, con tubería de acero galvanizado, por exigencias del transmisor Rosemount 8732E al ser de conexión tipo brida, este método es uno de los más utilizados en la industria tanto de alimentos como petrolera, la señal que envía este instrumento será captado por un controlador, este elemento envía la señal de control a un variador de frecuencia el cual comanda una bomba centrífuga para así lograr la variación requerida del caudal.

1.2. Importancia

La construcción de la estación de caudal con el transmisor Rosemount 8732E permitirá al estudiante que realice prácticas con este tipo de instrumento, conociendo sus altas 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 ampliarán sus conocimientos en los diferentes métodos de medición de caudal, además realizarán prácticas de manipulación del transmisor Rosemount 8732E, podrán observar las características y funciones principales del instrumento industrial ya puesto en servicio en la estación, a más de reforzar conocimientos adquiridos en clase.

Al adicionar otra estación de caudal se realizarán comparaciones importantes con las otras estaciones ya implementadas en el laboratorio, ya que el instrumento posee características especiales, dando como resultado un conocimiento selectivo entre instrumentos que actualmente se encuentran en el mercado y sus campos de aplicación.

El laboratorio de Control de Procesos y Redes Industriales posee varios tipos de instrumentos con los cuales los estudiantes abarcan conocimientos profesionales a esto se sumará un nuevo sistema usado en la estación de caudal que contiene un transmisor con brida, dado que en las industrias utilizan sistemas bridados en los transmisores de flujo, este instrumento será de gran ayuda para indicar los pasos necesarios para su instalación, puesta en servicio y el mantenimiento que se debe llevar a cabo para un funcionamiento óptimo.

1.3. Introducción

En la presente sección se hará alusión a la variable caudal, a los equipos que integran la estación, de forma especial a los instrumentos que están presentes en el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, los cuales

se nombran a continuación: transmisor Rosemount 8732E de caudal, un PLC Siemens S7-1500, con sus respectivos módulos analógicos y fuente de alimentación, una tarjeta de la NATIONAL INSTRUMENTS NI MYDAQ, un variador de frecuencia DELTA VFD004E23A, una bomba centrífuga de ½ HP, además se describen los métodos de control que están implementados en la estación de caudal.

1.4. Variable caudal

Es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo. Por lo general se identifica con el flujo volumétrico o volumen que atraviesa por un área dada en la unidad de tiempo. Los principales motivos para la medición del flujo son:

- Transferencia custodiada.
- Control de inventario.
- Detección de filtración.
- Control del Proceso.

1.5. Unidades de medición de caudal

Las principales unidades que expresan el caudal tanto volumétrico, másico y densidad de caudal son: (Ingemecánica)

- Caudal Volumétrico.
- Caudal Másico.
- Densidad de caudal Másico.

1.5.1. Caudal volumétrico

Es la cantidad de fluido (volumen) que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Unidad Básica Sistema Internacional (S.I.): (m³/s). Equivalencias:

- 1 ft³/h = 7,8658 · 10⁻⁶ m³/s.
- 1 ft³/min = 4,7195 · 10⁻⁴ m³/s.
- 1 US gal/hora = 1,0515 · 10⁻⁶ m³/s.

- 1 UK gal/hora = $1,2628 \cdot 10^{-6}$ m³/s.
- 1 barrel/day = $1,8401 \cdot 10^{-6}$ m³/s.
- 1 US gal/min = $6,3089 \cdot 10^{-5}$ m³/s.
- 1 UK gal/min = $7,5766 \cdot 10^{-5}$ m³/s.
- 1 mgd = $5,2617 \cdot 10^{-2}$ m³/s.

1.5.2. Caudal másico

Corresponde al flujo másico de una sustancia tal que una cantidad de 1 kilogramo de masa atraviesa una sección determinada en 1 segundo. Unidad Básica Sistema Internacional (S.I.): (kg/s). (Ingemecánica)

Equivalencias:

- 1 libra/hora (lb/h) = $1,2600 \cdot 10^{-4}$ kg/s.
- 1 ton/day (short) = $1,0500 \cdot 10^{-2}$ kg/s.
- 1 ton/day (long) = $1,1760 \cdot 10^{-2}$ kg/s.
- 1 ton/hora (short) = $2,5200 \cdot 10^{-1}$ kg/s.
- 1 ton/hora (long) = $2,8224 \cdot 10^{-1}$ kg/s.

1.5.3. Densidad de caudal másico

Representa la cantidad de masa de una sustancia que atraviesa la unidad de área por unidad de tiempo. Unidad Básica Sistema Internacional (S.I.): (kg/m²s). (Ingemecánica)

Equivalencias:

- 1 lb/h * ft² = $1,3562 \cdot 10^{-3}$ kg/m²s.
- 1 kg/h * ft² = $2,9900 \cdot 10^{-3}$ kg/m²s.
- 1 lb/s * ft² = $4,8824$ kg/m²s.

1.5.4. Métodos para medir caudal

La medición de caudal ha evolucionado, desde los principios clásicos a los más actuales, obteniendo cada vez una medida más precisa del caudal en una tubería (**Tabla 1**).

Tabla 1

Formas de Medición de Caudal

		SISTEMA	ELEMENTO	TRANSMISOR
MEDIDORES VOLUMETRICOS	Presión diferencial	Placa orificio		Equilibrio de fuerzas Silicio difundido
		Tobera		
		Tubo Venturi		
		Tubo pitot		
		Tubo annubar		
	Área variable	Rotámetro		Equilibrio de movimientos Potenciométricos Puente de impedancias
	Velocidad	Vertedero con flotador en canales abiertos.		Potenciométrico. Piezoeléctrico.
		Turbina.		
		Sondas ultrasónicas.		
	Tención inducida	Medidor Magnético		Convertidor Potenciométrico.
Desplazamiento positivo	Disco giratorio.		Generador tacométrico o Transductor de impulsos	
	Pistón oscilante.			
	Pistón alternativo.			
	Medidor Alternativo	Cicloidal		
		Birrotor		
	Oval			
	Medidor paredes deformantes.			
Torbellino	Medidor de frecuencia de termistancia, condensador o ultrasonidos.		Transductor de resistencia	
Oscilante	Válvula Oscilante		Transductor de impulsos	
Compensación de presión y temperaturas en medidores volumétricos.				
MEDIDORES DE CAUDAL MASA	Térmico	Diferencia temperaturas en dos sondas de resistencia.		Puente de Wheatstone
	Momento	Medidor axial.		Convertidor de par
		Medidor axial de doble turbina.		
Fuerza de Coriolis	Tubo de vibración.			

Fuente: (Creus, 2010)

1.6. Transmisor Rosemount 8732e

1.6.1. Principio del transmisor 8732E

Es un transmisor basado en principios magnéticos o sistemas de tensión inducida, el cual realiza la medida de caudal de forma indirecta mediante el principio de Faraday, proporcionando una señal de salida de 4 a 20 mA, a más de ser un transmisor inteligente, la precisión y la estabilidad que el instrumento ofrece es superior al de sus antecesores para la medición de caudal volumétrico, su calibración y ajuste no se lo realiza a menudo ya que las características principales lo califican como estable y rígido para el fin que fue creado.

1.6.2. Transmisor Rosemount 8732E (AC)

El caudalímetro Rosemount consta de un sensor y un transmisor, el cual permite medir el caudal volumétrico mediante la detección de la velocidad de un líquido que pasa a través de un campo magnético. El sensor Rosemount 8732E se instala en línea con la tubería del proceso, puede ser instalada de forma vertical u horizontal. La forma de calcular el caudal se basa en:

1. Bobinas situadas en lados opuestos del sensor que generan un campo magnético.
2. Electrodo situados perpendicularmente a las bobinas que hacen contacto con el fluido del proceso.
3. El líquido que se desplaza a través del campo magnético genera un voltaje en los dos electrodos siendo proporcional a la velocidad del caudal.
4. El instrumento energiza a las bobinas para generar un campo magnético y acondiciona electrónicamente el voltaje detectado por los electrodos proporcionando una señal.
5. El transmisor puede estar integrado al sensor o puede montarse remotamente a él (**Figura 1**). (ROUSEMOUNT, 2010)

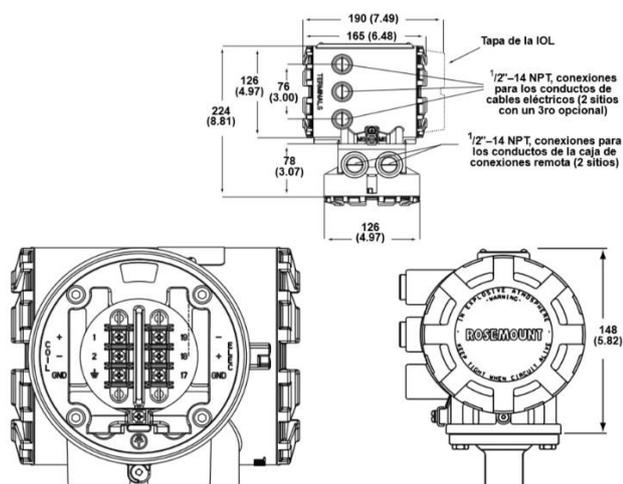


Figura 1: Plano dimensional ROSEMOUNT 8732E

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

1.6.3. Consumo de potencia del transmisor

El instrumento 8732E puede ser alimentado de 12 a 42 Vcc o de 90 a 250 Vca, 50–60 Hz. El octavo dígito en el número de modelo del transmisor designa la fuente de alimentación adecuada que se requiere (**Tabla 2**).

Tabla 2

Formas de Medición de Caudal

Número de Modelo	Requisito de alimentación
1	90–250 V CA
2	12–42 V CC

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

1.6.4. Instalación del transmisor Rosemount 8732E

Para la instalación del Transmisor es necesario tener en cuenta las siguientes precauciones:

- Evitar la temperatura y la vibración excesivas.
- Líneas de alta vibración con transmisores integrados.
- Instalaciones bajo luz solar directa en climas cálidos.
- Instalaciones a la intemperie en climas fríos.

- El transmisor necesita alimentación externa; por ende debe existir acceso a una fuente de alimentación adecuada.

Al poner en funcionamiento el transmisor es necesario varios pasos previos que deben realizarse para facilitar dicho proceso:

- Identificar el proceso y la aplicación que se va a instrumentar.
- Configurar los interruptores del hardware si es necesario.
- Tener en cuenta los requisitos mecánicos, eléctricos y medio ambientales.

Los transmisores remotos pueden montarse en una tubería de hasta dos pulgadas de diámetro o en una superficie plana (**Tabla 3**). (ROSEMOUNT, 2012)

Tabla 3

Montaje del Transmisor 8732E

Montaje	Descripción
Tubo	1. Ensamblar el soporte de montaje en la tubería. 2. Acoplar el modelo 8732 al soporte de montaje usando los tornillos de montaje.
Superficie Plana	Acoplar el modelo 8732 al sitio de montaje usando los tornillos de montaje

Fuente: (ROSEMOUNT, 2012)

1.6.5. Materiales necesarios para la instalación del transmisor.

a. Cable según temperatura

Se utiliza un cable calibre 12 a 18 AWG. Para conexiones a temperaturas ambientales superiores a 60 °C (140 °F), usar un cable clasificado para al menos 90 °C (194 °F).

b. Requisitos para las fuentes de alimentación

Conectar el transmisor de acuerdo a los requisitos eléctricos del país y de la planta para el voltaje de alimentación. Además, se deben acatar los requerimientos del cable de alimentación.

c. Categoría de instalación

La categoría de instalación para el Rosemount 8732 es (sobrecarga de voltaje) categoría II.

d. Protección contra sobrecarga de voltaje

El transmisor del caudalímetro requiere protección contra sobrecarga de voltaje en las líneas de alimentación (**Tabla 4**). (ROUSEMOUNT, 2010)

Tabla 4

Valores de fusibles de acuerdo a la alimentación

Salida de Alimentación	Valor de fusibles
110 V CA	250V, 1 A, Acción Rápida
220 V CA	250V, 2 A, Acción Rápida
42 V CC	50V, 3 A, Acción Rápida

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

e. Conexión de la alimentación del transmisor

Es necesario seguir algunos pasos para la conexión de alimentación del Rosemount 8732E que se describen a continuación:

1. Verificar que la fuente de alimentación y que el cable cumplan con los requisitos (Para FIELDBUS FOUNDATION se debe suministrar alimentación que sea independiente de la alimentación para la bobina. Para obtener resultados óptimos, se recomienda usar cable en pares trenzados y apantallado) (**Tabla 5**).

Tabla 5

Especificaciones para el cableado del FIELDBUS

Características	Especificación ideal
Impedancia	100 ohmios +- 20% a 31,25 KHZ
Calibre del cable	18 AWG
Protección del apantallado	90%
Atenuación	3 db/km
Desequilibrio Capacitivo	2 nF/km

Fuente: (ROSEMOUNT, 2012)

2. Apagar la fuente de alimentación.
3. Abrir la tapa de los terminales de la alimentación.
4. Tender el cable de alimentación a través del conducto hasta el transmisor.
5. Conectar los cables como se muestra en la **(Figura 2)**.
6. Conectar CA Neutral o CC- al terminal.
7. Conectar Línea CA o CC+ al terminal 10.
8. Conectar Tierra CA o Tierra CC al tornillo de tierra que se encuentra en el interior de la carcasa del transmisor. (ROSEMOUNT, 2012)

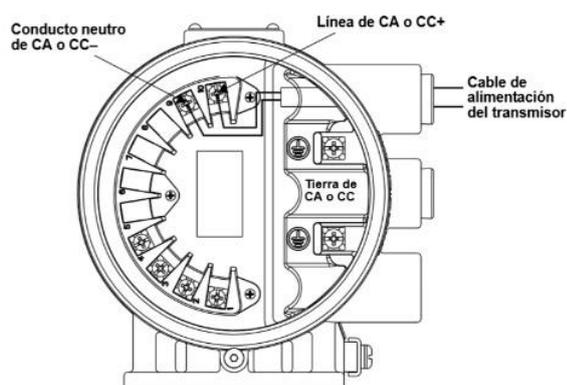


Figura 2: Conexiones de alimentación de CA del Transmisor

Fuente: (ROSEMOUNT, 2012)

f. Voltaje en los terminales de comunicación del transmisor

La comunicación del FIELDBUS FOUNDATION requiere un voltaje mínimo de 9 V cc y uno máximo de 32 V cc en los terminales de comunicación

del transmisor (El voltaje en los terminales de comunicación del transmisor no debe rebasar 32 Vcc.). No se debe conectar los terminales de comunicación del transmisor a una línea de corriente alterna (Puede dañar el transmisor).

g. Cableado de campo fieldbus

Para las comunicaciones mediante FIELDBUS FOUNDATION se debe suministrar alimentación que sea independiente de la alimentación para la bobina. Para obtener resultados óptimos, se debe usar cable en pares trenzados y apantallado. Para instalaciones nuevas o para obtener un rendimiento óptimo, se debe utilizar cable trenzado diseñado especialmente para EL FIELDBUS (**Tabla 5**). (El cableado de señal del FIELDBUS FOUNDATION para el 8732 no se ve afectado por la polaridad).

h. Conexión del cableado del transmisor Fieldbus.

Para conectar el 8732E al segmento del FIELDBUS FOUNDATION (FF), realizar los siguientes pasos. (ROUSEMOUNT, 2010)

1. Asegurar que la fuente de alimentación y el cable de conexión satisfagan los requisitos descritos anteriormente y en “Cableado de campo” (**Figura 3**).
2. Apagar el transmisor y las fuentes de alimentación.
3. Pasar el cable del FIELDBUS FOUNDATION hacia dentro del transmisor.
4. Conectar –FF al terminal 1.
5. Conectar +FF al terminal 2 (**Figura 4**).

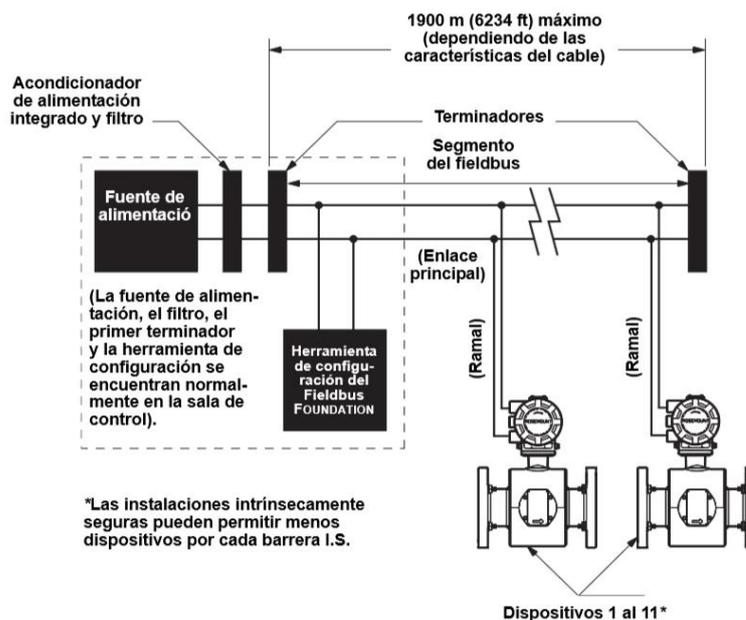


Figura 3: Cableado de campo del transmisor Rosemount 8732

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

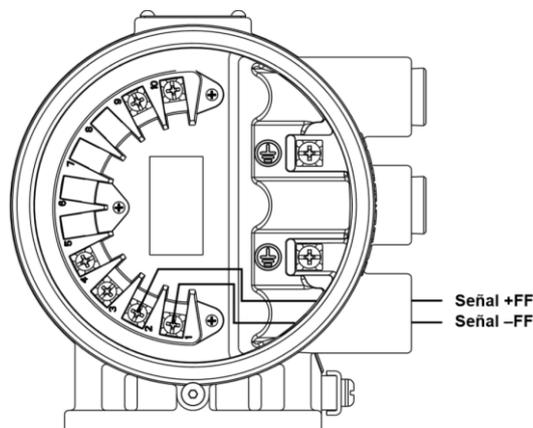


Figura 4: Conexiones de la señal del FIELDBUS FOUNDATION

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

1.6.6. Configuración del transmisor 8732E

Se tiene acceso a las funciones del software a través de la interfaz local del operador (LOI), AMS, un comunicador portátil o un sistema de control. Las variables de configuración se pueden cambiar en cualquier momento y las

instrucciones específicas se proporcionan a través de las instrucciones en pantalla.

1.6.7. Interfaz local del operador

Con la interfaz local del operador (LOI, por sus siglas en inglés), el operador puede tener acceso a cualquier función del transmisor para cambiar los ajustes de los parámetros de la configuración, revisar los valores totalizados. La interfaz local del operador (LOI) está integrada a la electrónica del transmisor (**Figura 5**).

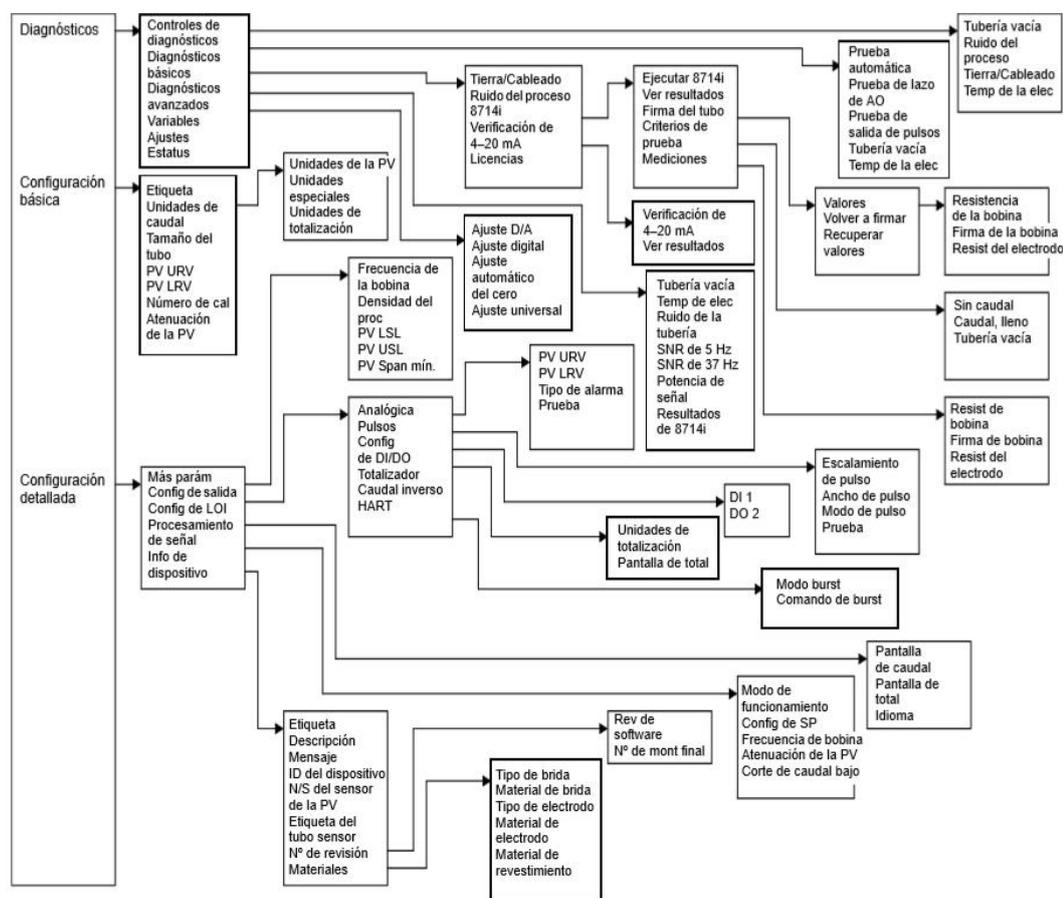


Figura 5: Estructura de los menús de la interfaz local del operador

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

1.6.8. Características básicas del LOI

El LOI posee cuatro teclas de flechas de navegación que se utilizan para acceder a la estructura de los menús (**Figura 6**).

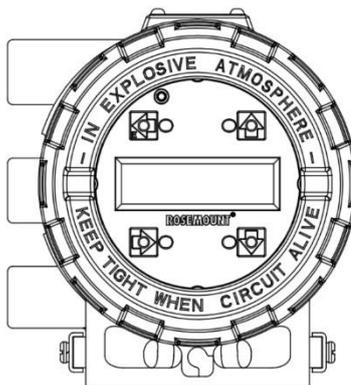


Figura 6: Teclado de la interfaz local del operador

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

1.6.9. Introducción de datos

La LOI no posee teclas numéricas por lo tanto los datos se ingresan de la siguiente manera: (ROUSEMOUNT, 2010)

1. Acceder a la función adecuada.
2. La flecha DERECHA es útil para trasladarse al valor que se quiere cambiar.
3. Las flechas ARRIBA y ABAJO para cambiar el valor deseado. Si son datos numéricos, desplazarse por los dígitos 0–9, punto decimal y guion. Si son datos alfabéticos, desplazarse a través de las letras del alfabeto A–Z, de los dígitos 0–9 y de los símbolos z, &, +, –, *, /, \$, @, % y del espacio en blanco.
4. Pulsar la tecla “E” (tecla flecha IZQUIERDA) cuando se hayan completado todos los cambios para guardar los valores ingresados.

1.6.10. Acceder a estructuras de menú

Se usa la tecla de abajo para acceder a las estructuras de menú, utilizar las teclas de flechas para seleccionar los parámetros deseados para revisarlos/cambiarlos como se muestra en la **(Tabla 6)**. Los parámetros se configuran de dos maneras, Table Values (Valores de tabla) o Select Values (Valores selectos).

- **Valores de tabla:** Parámetros tales como unidades, que están disponibles en una lista predefinida.
- **Valores selectos:** Parámetros que constan de un número creado por el usuario o de una cadena de caracteres, como el número de calibración; los valores se introducen un carácter a la vez usando las teclas de flecha.

Tabla 6

Pasos para cambiar la configuración del Transmisor

Ajuste de Tamaño de la tubería	Cambiar el Rango de salida analógica	Bloqueo del indicador	Totalizador
1. Pulsar la flecha ABAJO.	1. Pulsar la flecha ABAJO	Es útil para impedir que la configuración se cambie de manera accidental.	Iniciar el totalizador Pulsar la flecha ABAJO para mostrar la pantalla del totalizador y pulsar “E” para comenzar la totalización. Un símbolo destellará en la esquina inferior derecha indicando que el medidor está totalizando.
2. Seleccionar el tamaño del tubo	2. Usando las flechas, seleccionar PV, URV en el menú	Se puede usar HART o presionando la tecla de flecha ARRIBA durante 10 segundos. Cuando se activa el bloqueo del indicador, aparecerá DL en la esquina inferior izquierda de la pantalla.	Parar el totalizador Presionar la flecha ABAJO para mostrar la pantalla del totalizador y presionar “E” para terminar la totalización. El símbolo ya no destellará en la esquina inferior derecha.
3. Pulsar la flecha ARRIBA o ABAJO para variar el tamaño de la tubería al siguiente valor.	3. Pulsar la tecla de flecha DERECHA para posicionar el cursor.		Poner a cero el totalizador Detener el totalizador, presionar la flecha DERECHA para poner a cero el valor total NETO. Para poner a cero el valor del total bruto, se debe cambiar el tamaño del tubo.
4. Una vez que se alcance el tamaño deseado, pulsar la tecla “E” (la flecha izquierda).	4. Pulsar la flecha ARRIBA o ABAJO para fijar el número.	Para desactivar el bloqueo del indicador (DL), presionar la tecla de flecha ARRIBA durante 10 segundos.	
5. Fijar el lazo en funcionamiento manual, pulsar “E” otra vez.	6. Pulsar “E”.		

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

1.6.11. Mensajes de diagnóstico

Los siguientes mensajes de diagnóstico pueden aparecer en la pantalla de la interfaz local del operador (**Tabla 7**).

Tabla 7

Mensajes de diagnóstico del Transmisor

Mensajes de diagnóstico Transmisor ROSEMOUNT 8732 E	
Fallo de la electrónica	Retorno a cero positivo (PZR) activado
Circuito abierto de la bobina	Fallo de temperatura de la electrónica
Fallo del ajuste digital	Salida de pulsos fuera de rango
Fallo del ajuste automático del cero	Tubería vacía
Fallo del ajuste automático	Caudal inverso
Caudal > límite del sensor	Temperatura de la electrónica fuera de rango
Salida analógica fuera de rango	

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

Los siguientes mensajes de error pueden aparecer en la pantalla de la interfaz local del operador (**Tabla 8**).

Tabla 8

Mensajes de error del Transmisor

Mensajes de error Transmisor ROSEMOUNT 8732E	
Elevado nivel de ruido en el proceso	La verificación de lazo de 4–20 mA falló
Fallo de conexión a tierra/cableado	La verificación del 8714i falló

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

1.7. Variador Delta

La serie VFD-E son variadores vectoriales sin sensor y que poseen un PLC internamente el cual le permite total flexibilidad. Poseen una carcasa tipo IP20, y la capacidad varía desde las fracciones hasta 30hp, con voltajes de entrada en el rango de 110VAC a 460VAC (**Figura 7**).

El diseño de estos instrumentos permiten la denominada distancia cero, el cual refiere a que existe la posibilidad de colocar los drives uno junto con otro para optimizar el espacio en tableros. Adicionalmente posee tarjetas de expansión que aumentan el número de terminales de entrada/salida (I/O), y módulos FIELDBUS para una variedad de protocolo de comunicación. Entre las principales características que se pueden mencionar, se tiene: (Delta Electronics, 2008)

- Frecuencia de salida: 0.1- 600Hz.
- Diseño modular y compacto.
- Función PLC integrada.
- Filtro EMI incorporado (monofásico 230 V / trifásico 460 V).
- Puente RFI extraíble para redes IT.
- Fácil compartición del bus DC.
- Protección completa.
- Curva ajustable V/f (3 puntos).
- Instalación uno al lado del otro (sin espacios).
- Montaje en raíl DIN.
- Control PID en lazo cerrado incorporado.



Figura 7: Variadores delta series VFD-E

Fuente: (Mecánica Moderna, 2010)

1.7.1. Modelos y etiquetas de los variadores Delta serie VFD-E

Para identificar los modelos y sus características de los variadores es necesario tener en cuenta la etiqueta que viene con el instrumento de la

siguiente manera: Ejemplo para un variador de frecuencia para motores de CA de 1 HP / 0,75 KW trifásico 230V **(Figura 8)**.

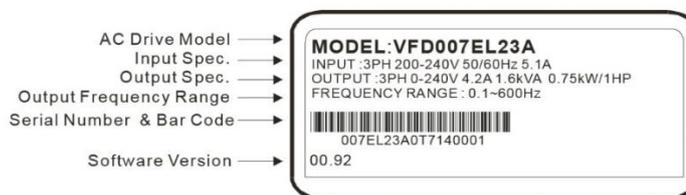


Figura 8: Modelo del variador referenciado con etiqueta

Fuente: (Delta Electronics, 2008)

Adicionalmente la serie de variador también describe al instrumento de la siguiente manera **(Figura 9)**:

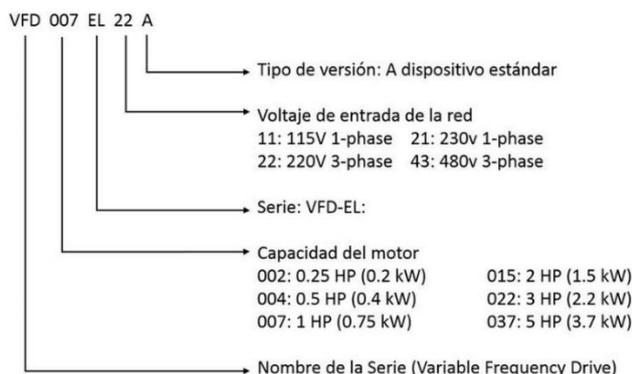


Figura 9: Serie de un variador y su explicación detallada

Fuente: (Delta Electronics, 2008)

La serie VFD-E viene en dos modelos, los cuales se los diferencia por las letras A y B las cuales especifican el rango de suministro eléctrico **(Tabla 9)**.

Tabla 9

Rango de suministro eléctrico

Estructura	Rango de suministro Eléctrico
A	0,25 a 2 hp (0,2 a 1,5 kW)
B	1 a 5 hp (0,75 a 3,7 kW)

Fuente: (Delta Electronics, 2008)

1.7.2. Variador Delta VFD004E23A

a. Descripción del variador

El variador que se instala en la estación de flujo es el modelo VFD004E23A el cual teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se puede determinar las características siguientes (**Figura 10**): (Delta Electronics, 2008)

- VFD: Variador de frecuencia.
- 004:0,5 HP (0,4 kW).
- E: Serie E.
- 23: 230 V, 3 Fases.
- A: estándar tipo A.

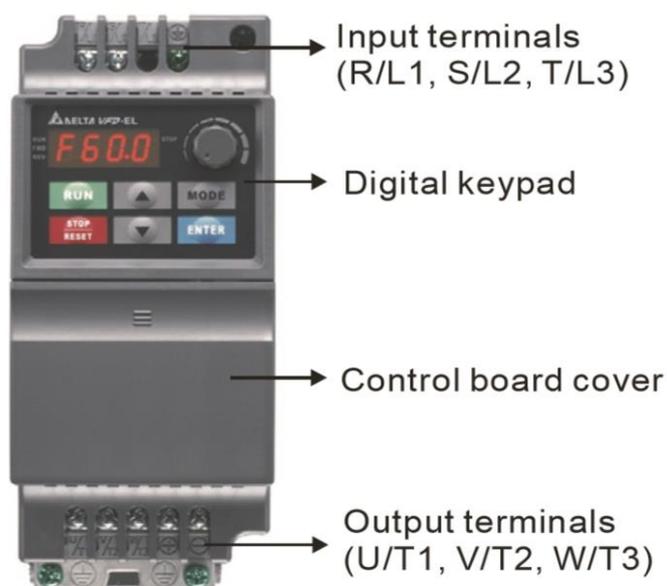


Figura 10: Estructura interna del variador delta VFD004E23A

Fuente: (Delta Electronics, 2008)

b. Terminales del circuito principal

El variador delta posee terminales los cuales están distribuidos de la siguiente manera (**Figura 11 y Tabla 10**).

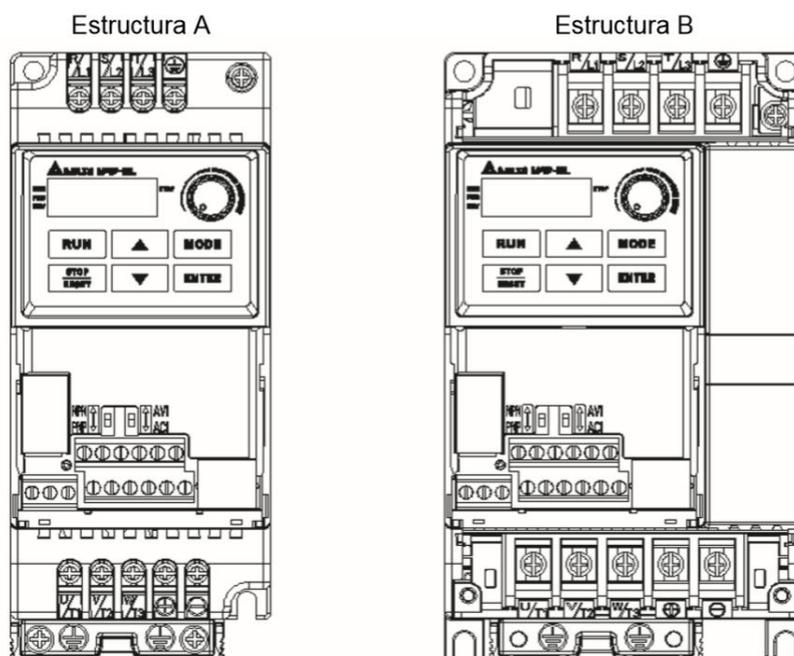


Figura 11: Terminales de conexión del variador Delta

Fuente: (Delta Electronics, 2008)

Tabla 10

Estructuras del variador Delta (A y B)

Estructura	Terminales de suministro eléctrico	Par Motor	Cable	Tipo de cable
A	R/L1, S/L2, T/L3 U/T1, V/T2, W/T3	14,2 A 16,3 KG fuerza -cm	12-18 AWG	Solo cobre, 75 grados centígrados
B	R/L1, S/L2, T/L3 U/T1, V/T2, W/T3	16,3 a 19,3 KG fuerza-cm	8-18 AWG	Solo cobre, 75 grados centígrados
	+, -, GND			

Fuente: (Delta Electronics, 2008)

c. Instalación y cableado del variador

Para que el variador delta trabaje en forma óptima son necesarias las siguientes condiciones ambientales (**Tabla 11**):

Tabla 11

Condiciones Ambientales del Variador de Frecuencia

Operación	Temperatura del aire	-10~ +50 C, para UL y cUL -10~ +40 C, para el montaje lado - lado
	Humedad relativa	< 90%, no se permite condensación
	Presión atmosférica	86 ~ 106 kPa
	Altitud en el sitio de instalación	< 1000 m
	Vibración	< 20 HZ: 9,80 m/s ² (1G) max 86 ~ 106 HZ: 5,88 m/s ² (0,6 G) max
Nivel de Contaminación	2: Adecuada para un ambiente tipo fabrica	

Fuente: (Delta Electronics, 2008)

d. Cableado externo del variador Delta

- El suministro de energía: Depende del tipo de variador y de la potencia que maneje.
- Fusible/NFB: Depende de la carga del sistema a controlar.
- Arrancador Magnético: Este instrumento no debe ser utilizado como interruptor de entrada y salida del alternador puesto que disminuye el tiempo de vida del producto.
- Reactor de entrada de línea de corriente alterna: Es útil para mejorar el factor de potencia de entrada, logrando así reducir armónicos y proporcionar protección con respecto a perturbaciones de la línea de corriente alterna.
- Reactor de fase cero: Se usa para reducir el ruido de la radio, especialmente cuando existe la presencia del algún equipo de audio cerca del instrumento.
- Filtro EMI: Se encarga de reducir la interferencia electromagnética.
- Resistor de frenado y unidad de frenado, usado para disminuir el tiempo de desaceleración del motor.
- Reactor de salida de línea de corriente alterna; para aplicaciones donde se necesita distancias largas de instalación mayor a 20m. **(Figura 12)**.

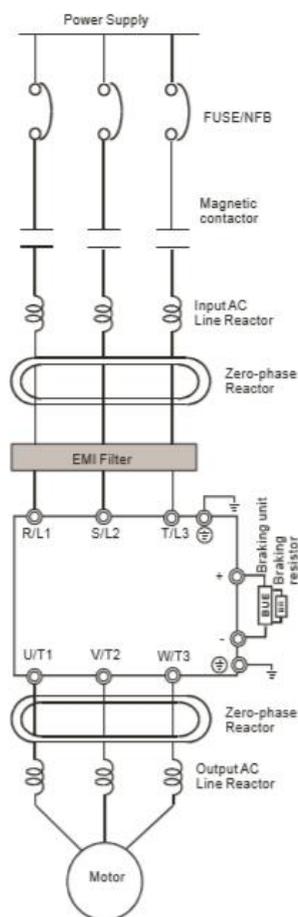


Figura 12: Conexión del circuito principal

Fuente: (Delta Electronics, 2008)

1.8. Bomba centrífuga

En la industria se presentan problemas de transporte de líquidos a través de sistemas de tuberías, debiendo vencer presiones y desniveles, que hacen necesario el empleo de máquinas hidráulicas. Existen dos grandes grupos fundamentales:

- Las de desplazamiento positivo.
- Las de efecto centrífugo.

Las bombas de efecto centrífugo poseen mayor relevancia por sus grandes posibilidades y amplio campo de aplicación, habiendo desplazado casi por entero a las de desplazamiento positivo.

1.8.1. Clasificación

En el mercado puede encontrarse diversidad de bombas siendo las más utilizadas por sus características para procesos industriales (**Tabla 12**).

Tabla 12

Tipos de bombas centrífugas

Alternativas	Rotativas	Centrífugas
<ul style="list-style-type: none"> • Pistón • Embolo • Diafragma 	<ul style="list-style-type: none"> • Engranajes • Tornillo • Paletas • Levas • Especiales 	<ul style="list-style-type: none"> • Radiales • Diagonales • Axiales

Fuente: (Bombas Ideal S.A, 2008)

1.8.2. Ventajas de las bombas centrífugas

Entre las principales ventajas de las bombas centrífugas se puede destacar:

- Gran velocidad de funcionamiento, que permite su accionamiento directo por motores eléctricos, pequeño tamaño y peso.
- Gran seguridad de marcha y servicio.
- Mínimo número de elementos de desgaste.
- Las bombas centrífugas constituyen no menos del 80% de la producción mundial de bombas, porque es la más adecuada para manejar más cantidad de líquido que la bomba de desplazamiento positivo. (Bombas Ideal S.A, 2008)

1.8.3. Capacidad de trabajo de una bomba centrífuga

En bombas de una etapa se puede alcanzar presiones de hasta 5 atm, si se realiza con varias etapas se alcanza hasta 25 atm de presión, depende del número de etapas. Si son bombas de baja presión van hasta 100 psi, mientras que otras pueden producir presiones mayores a 500 psi.

1.8.4. Funcionamiento

- Una tubería de aspiración: concluye en la brida de aspiración.
- El impulsor o rodete: es un conjunto de álabes, los cuales giran dentro de una carcasa circular. El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta el rodete, experimentando un cambio de dirección y acelerándose. Los álabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación muy rápido siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga.
- La voluta es un órgano en forma de caracol alrededor del rodete, su misión es recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba.
- Una tubería de impulsión a la salida de la voluta donde el líquido es evacuado (**Figura 13**). (Martín, 2012)

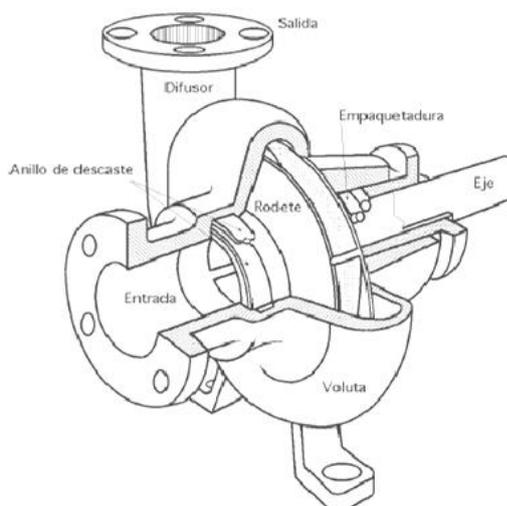


Figura 13: Bomba centrífuga, disposición, esquema y perspectiva

Fuente: (Martín, 2012)

1.8.5. Cavitación

Es uno de los problemas más graves que afectan a las bombas, consiste en la implosión de burbujas de vapor (huecos) formadas en la entrada al rodete como consecuencia de un vacío parcial local por debajo de la presión de evaporación del líquido a transportar, el colapso instantáneo de las

burbujas de vapor genera elevadísimas presiones que igualan a la tensión de valor del líquido. La cavitación origina pérdidas de potencia (altura de presión), ruidos, reducción del rendimiento y daños materiales (en el interior de la bomba). (Bombas Ideal S.A, 2008)

Una magnitud importante para una bomba centrífuga es el valor NPSH (Net Positive Suction Head), este indica la mínima presión que se necesita en la entrada para que la bomba trabaje sin cavitación (**Figura 14**). (Martín, 2012)



Figura 14: Efecto de la cavitación en la capacidad de la bomba

Fuente: (Martín, 2012)

a. Causas de la cavitación

- La bomba fue sobredimensionada por el ingeniero que la especificó o un vendedor inexperto.
- En un cambio en las demandas del sistema, haciendo a la bomba que no trabaje en su rango de mejor eficacia debido a un cambio en los requisitos de funcionamiento del sistema.
- La tercera causa más común de cavitación está en una elevación de la succión o una bomba cuyo lado de succión aspira de un hoyo debajo del eje de la bomba.
- La temperatura combinada con el suministro secundario de la succión pueden actuar para causar cavitación.
- Por las líneas de descarga del sistema que se corroen o se tapan, la bomba es restringida en su rendimiento y puede aparecer cavitación en la descarga. (Marchegiani, 2004)

b. Reconocer la cavitación

- En su forma media puede ser reconocible debido a un ruido.
- Otra señal segura de cavitación es que la medición de presión en la descarga del sistema de bombeo fluctuará significativamente encima de un rango de 5-10 P.S.I.
- La cavitación causa muchos efectos indeseables. Y la bomba no está operando hidráulicamente en su equilibrio apropiado, está sujeta a tensiones dentro de la máquina que causan desviaciones y un prematuro desgaste de los sellos y los rodamientos. (Marchegiani, 2004)

c. Evitar la cavitación

- Es preciso suministrar el líquido a la bomba con una determinada altura mínima de la columna de agua en la entrada.
- Aumento de la presión estática.
- Disminución de la temperatura del medio (reducción de la presión de vapor).
- Elección de una bomba con baja altura de presión de entrada (altura mínima de la columna de agua en la entrada, NPSH). (Marchegiani, 2004)

1.9. Controlador lógico programable

Es un dispositivo que está diseñado para la automatización, el control de una máquina o proceso industrial, en base a una lógica determinada que se define a través de un programa (**Figura 15**).

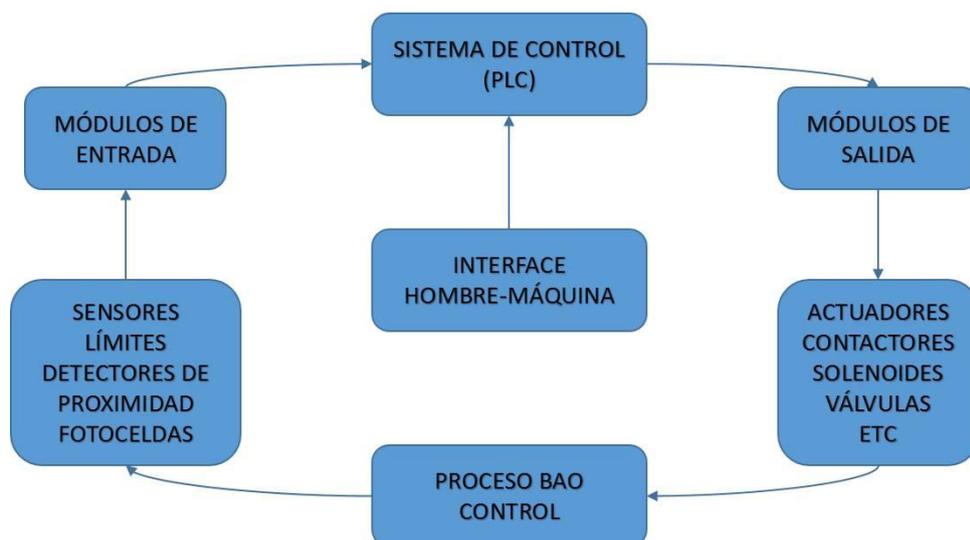


Figura 15: Diagrama de bloques para un proceso controlado por PLC

1.9.1. PLC SIEMENS S7-1500

El S7-1500 es la evolución de sus antecesores SIMATIC S7-300 y S7-400, ya que integra numerosas características de rendimiento y eficiencia, el sistema de automatización del S7-1500 ofrece al consumidor una mayor manejabilidad y un máximo rendimiento. El sistema de automatización del controlador lógico está homologado para el tipo de protección IP20 y para el montaje en un armario eléctrico. Entre las nuevas características se destaca **(Figura 16)**.

- Mayor rendimiento del sistema.
- Funcionalidad Motion Control integrada.
- PROFINET IO IRT.
- Pantalla integrada para el manejo y diagnóstico a pie de máquina.
- Innovaciones de lenguaje STEP 7 manteniendo las funciones probadas. (SIEMENS, 2010)

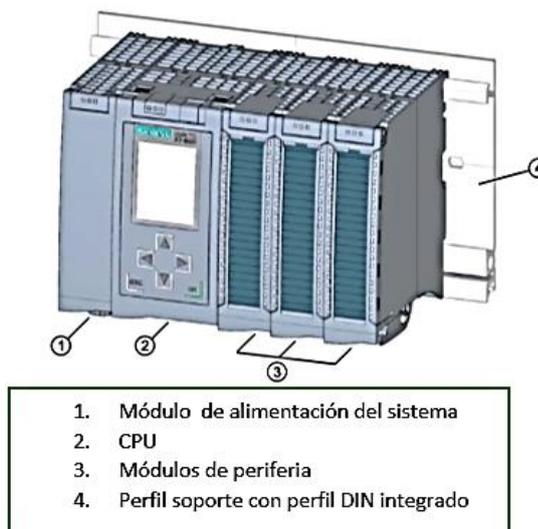


Figura 16: Configuración de un sistema de automatización S7-1500

Fuente: (SIEMENS, 2010)

1.9.2. Características del PLC S7-1500

En las (Tabla 13) y (Tabla 14) se muestra las principales características del sistema de automatización del PLC S7-1500. Para el funcionamiento de la CPU es necesario una SIMATIC Memory Card como memoria de carga, la cual permite realizar funciones como Datalog, Ficheros y Ejecución de una actualización de firmware. (SIEMENS, 2010)

Tabla 13

Características de configuración del PLC S7-1500

Características de la configuración	Significado
Configuración escalable	Ahorro de espacio, montaje a lo largo de todo el perfil de soporte, reducción del esfuerzo de configuración y documentación
Amplia gama de módulos	Campo de aplicación flexible y universal
Configuración con conectores U	Conexión rápida y sencilla de los módulos , con ampliación sencilla de la configuración del sistema
Realización de segmentos de potencia	Ampliación del sistema mediante la conexión de fuentes de alimentación del sistema adicionales

Fuente: (SIEMENS, 2010)

Tabla 14

Características del sistema de conexión

Características del sistema de conexión	Significado
Conector frontal giratorio.	Facilita el cambio del módulo en caso de mantenimiento o falla.
Posición de pre-cableado.	El cableado del módulo es fácilmente accesible, el cambio de módulos sin necesidad de aflojar el cableado, con mayor protección contra daños eléctricos porque todavía no está conectado eléctricamente.
Formación de grupos de potencial mediante inserción de puentes.	Facilidad en el cableado en el conector frontal.
Sistema CEM integrado (elemento de alimentación, abrazadera de pantalla y clip de pantalla).	Se minimiza la emisión y optimización de la inmunidad a perturbaciones.
Conector frontal de 40 polos para todos los módulos con un ancho constructivo de 35 mm.	Se maneja bajo una norma.
Dos posiciones de enclavamiento para la tapa frontal.	Más espacio para el cableado.
Codificación automática de los módulos de periferia/conectores frontales.	Brinda mayor seguridad al momento de cambio del módulo.
Amplia superficie para etiquetado.	Disponibilidad del espacio para marcar una identificación clara y una inscripción específica del usuario.

Fuente: (SIEMENS, 2010)

EL PLC 1500 posee integrada una pantalla en la cual cumple las siguientes funciones (**Figura 17**). (SIEMENS, 2010)

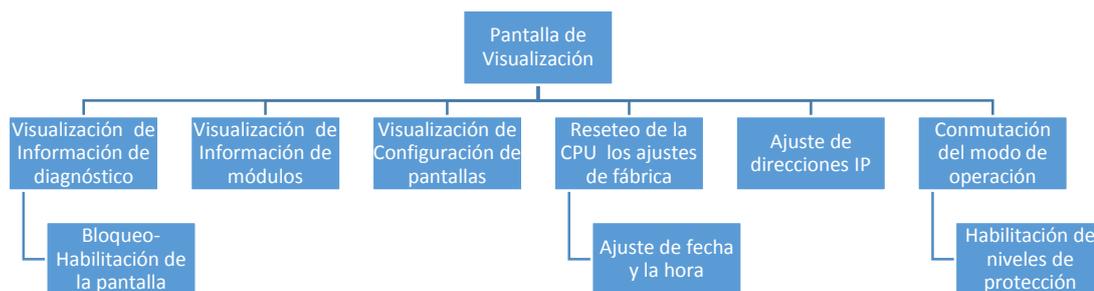


Figura 17: Funciones de la pantalla PLC 1500

Fuente: (SIEMENS, 2010)

1.9.3. Módulos de entradas y salidas analógicas

El PLC S7-1500 posee módulos de entradas y salidas analógicas con las siguientes características (Tablas 15) y (Tabla 16). (SIEMENS, 2014)

1.9.4. Módulo de entradas analógicas AI 8 x U/I/RTD/TC ST

Tabla 15

Características del Módulo de entradas analógicas

Módulo de entradas analógicas	AI 8 x U/I/RTD/TC ST
Número de entradas	8
Resolución	16 bits incl. el signo
Modo de medición	Tensión, corriente, resistencia, termo resistencia, termopar
Aislamiento galvánico entre los canales	No
Tensión nominal de alimentación	24 V DC
Diferencia de potencial admisible entre las entradas (UCM)	10 V DC
Alarma de diagnóstico y proceso	Sí
Modo isócrono soportado	No
Tiempo de conversión	9/23/27/107 ms
Compatible	
Centralizado con S7-1500	Si
Descentralizado con ET 200MP	

Fuente: (SIEMENS, 2014)

1.9.5. Módulo de salidas analógicas AQ 4 x U/I ST

Tabla 16

Características del Módulo de salidas analógicas

Módulo de salidas analógicas	AQ 4 x U/I ST
Número de salidas	4
Resolución	16 bits incl. el signo
Tipo de salida	Tensión y corriente
Aislamiento galvánico entre los canales	No
Tensión nominal de alimentación	24 V DC
Diferencia de potencial admisible entre S- y M_{ANA} (UCM)	8 V DC
Alarma de diagnóstico	Sí
Alarma de proceso	No
Modo isócrono soportado	No
Tiempo de conversión	9/23/27/107 ms
Compatible Centralizado con S7-1500 Descentralizado con ET 200MP	Si

Fuente: (SIEMENS, 2014)

1.9.6. Fuente de alimentación, 24 V DC / 8 A (SIPLUS PM 1507)

El diseño y la funcionalidad de la fuente SIMATIC PM 1507 de carga monofásica (PM = módulo de potencia), suministra energía a los componentes del sistema tales como:

- CPU S7-1500.
- Sistema de alimentación (PS).
- Módulos de E / S.

Adicional a esto puede ser utilizado para sensores y actuadores con 24 V DC (Tabla 17). (SIEMENS, 2015)

Tabla 17

Características de la fuente monofásica PM 1507

Fuente monofásica, 24 V DC / 8 A (SIPLUS PM 1507)	Modo 1	Modo 2
Fuente de alimentación	24 V / 8 A	
Voltaje nominal de alimentación	120 V	230 V
Rango de tensión	Ac 85 - 132 V	Ac 170 - 264 V
Frecuencia nominal	50 Hz	60 Hz
Corriente de entrada	Entrada de 120 V nominal es de 3.7 A	Entrada de 230 V nominal es de 1.7 A
Tensión nominal de salida	24 Vout	
Indicación de estado	LED verde para 24 V OK	
	LED rojo para el error	
	LED Amarillo para stand-by	
Retardo de inicio	Máximo 1.5 s	
El comportamiento / apagado	No hay rebase transitorio de Us (arranque suave)	
Potencia activa.	192 W	

Fuente: (SIEMENS, 2015)

1.9.7. Comunicación Profibus

El módulo de comunicación CM 1542-5, (**Figura 18 (a)**), se utiliza para la comunicación con dispositivos PROFIBUS subordinados en anchos de banda de 9,6 Kbits/s a 12 Mbits/s. Adicional a esto dicho módulo permite configurar líneas PROFIBUS independientes (controlar varios dispositivos de campo mediante varios segmentos PROFIBUS). (SIEMENS, 2013)

1.9.8. Comunicación Ethernet

El módulo de comunicaciones SIMATIC CP 1543-1, (**Figura 18 (b)**), permite conectar al PLC SIMATIC S7-1500 a redes Industrial Ethernet. Incluye una diversidad de características de seguridad, por ejemplo: cortafuegos SPI (Stateful Packet Inspection) y protocolos de encriptación de datos (FTPS y SNMPv3), este módulo de comunicación protege contra accesos no autorizados a estaciones S7-1500 concretas o a celdas de automatización completas. Por otra parte el procesador de comunicación puede integrar la estación S7-1500 en una red basada en IPv6. El módulo de Ethernet admite los siguientes servicios de comunicación:

- Comunicación PG/OP.
- Comunicación S7.
- Comunicación abierta (SEND/RECEIVE, FETCH/WRITE).
- Comunicación TI.
- Funciones de seguridad.
- Integración de S7-1500 en redes basadas en IPv6. (SIEMENS, 2013)

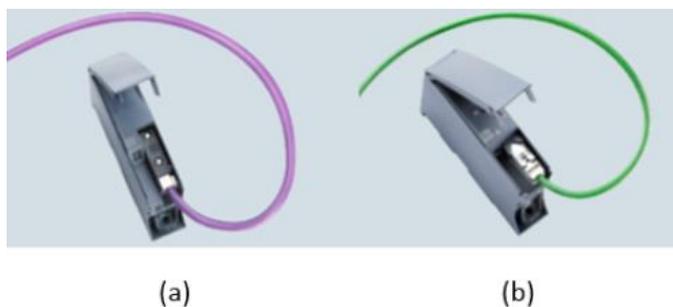


Figura 18 Comunicación PROFIBUS y ETHERNET

Fuente: (SIEMENS, 2013)

1.10. Pantalla SIEMENS KTP-600 basic color

En la actualidad los procesos industriales requieren visualización de forma estándar, especialmente en los sistemas de menor tamaño y en las aplicaciones sencillas. Estos paneles de operador con funciones básicas son considerados completamente suficientes. Las SIMATIC HMI (**Figura 19**),

Basic Panels ofrecen la funcionalidad básica requerida, para realizar un HMI en el cual se puede visualizar y representar los datos del proceso que se está controlando, además este panel de visualización ofrece la funcionalidad para acceder a varios usuarios según sea la prioridad asignada. (SIEMENS, 2014)



Figura 19 TOUCH KTP-600 PN

Fuente: (SIEMENS, 2014)

En la **(Tabla 18)** se describe las principales características y funciones de la pantalla KTP-600.

Tabla 18

Características KTP-600 PN

Funciones	KTP-600 Basic mono PN
Visualización	5.7 pulgadas
Resolución	320 x 240 px
Elementos de Control	TOUCH SCREEN / 6 teclas de función de pantalla
Memoria de Usuario	512 KB
Interfaces	1 x RJ 45 Ethernet para PROFINET
Software de Configuración	WinCC. Basic (TIA PORTAL) o superior

Fuente: (SIEMENS, 2014)

1.11. Tarjeta de adquisición de datos NI MYDAQ

La adquisición de datos (DAQ) es un proceso de obtener en el computador las siguientes señales: voltajes, corrientes, temperaturas, presión o sonido. El sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable (**Figura 20**). (Universidad del País de Vasco, 2013)



Figura 20 Ni MYDAQ

Fuente: (Universidad del País de Vasco, 2013)

Estos sistemas de medida o adquisición de datos comparados con los sistemas anteriores, la medición de datos por medio de la DAQ aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las computadoras estándares en la industria, entregando una solución de medidas más eficiente y muy rentable.

El sistema de adquisición de datos DAQ está compuesto por tres tipos de hardware: un bloque Terminal, un cable y un instrumento DAQ tal y como se muestra en la (**Figura 21**).

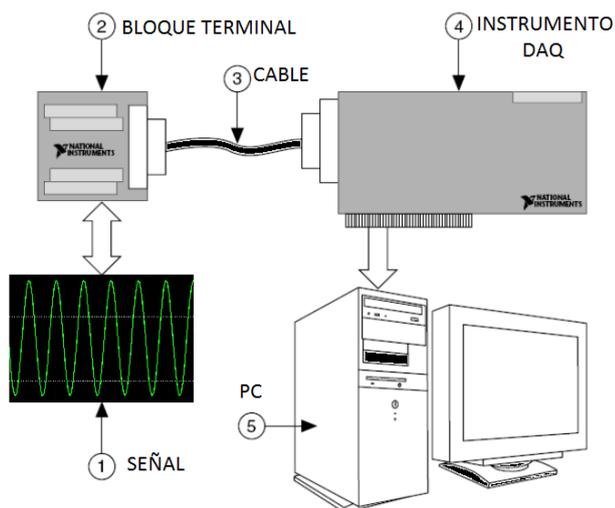


Figura 21: Partes del sistema DAQ

Fuente: (Universidad del País de Vasco, 2013)

El bloque terminal es aquel que está compuesto por conectores para las entradas y salidas de las señales a medir como se muestra en la (Figura 22). (Universidad del País de Vasco, 2013)

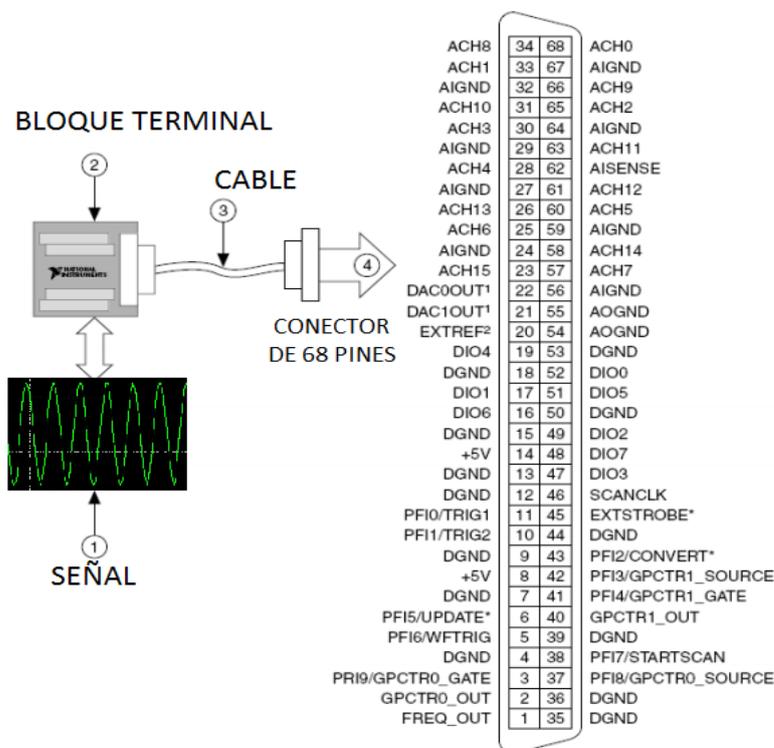


Figura 22: Terminal de conexión

Fuente: (Universidad del País de Vasco, 2013)

1.12. Control automático de procesos

En procesos industriales, es necesario el control automático de algunas variables como: caudal, temperatura, presión, etc. Para mejorar, aumentar y estandarizar la producción de la empresa. El principio básico de casi todo control automático es la retroalimentación como la **(Figura 23)**, lo cual hace que el controlador se mantenga siempre en contacto con la variable controlada y a la vez esté bien informado del estado de la variable para así realizar acciones correctivas sobre la misma. (Instituto Argentino de Automación Industrial , 2010)

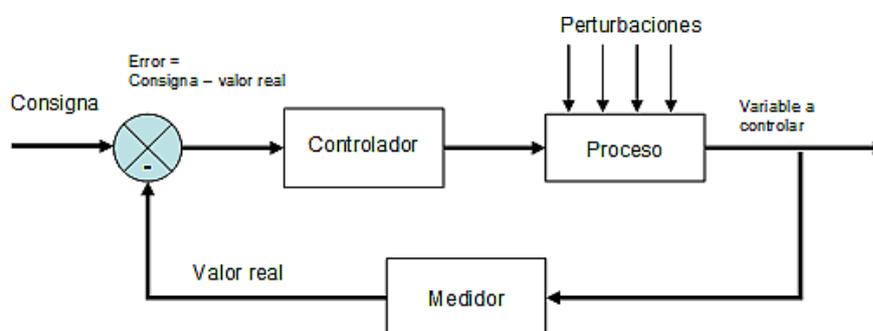


Figura 23: Diagrama del Control automático de Procesos

Fuente: (Instituto Argentino de Automación Industrial , 2010)

Los tipos de control que se pueden implementar dependen de la necesidad y de los requerimientos del proceso, teniendo dos características principales:

- **Cambios de carga:** son los cambios que se puede presentar en la variable que se está controlando, debido a las variaciones que puede tener el proceso.
- **Tiempo requerido:** es el tiempo que se necesita para que la variable llegue a su nuevo valor de consigna, después de existir un cambio de carga. Este tiempo se debe a propiedades específicas del proceso como son capacitancia, tiempo de transporte y resistencia.
- **Capacitancia:** Es la medida de una característica de un proceso para transferir o mantener cierta cantidad de energía en relación a una

cantidad unitaria de alguna variable de referencia. En un proceso la capacitancia no debe ser ni muy alta ni muy baja ya que si fuera alta la variable tardaría en llegar a su valor nuevo si se le realizara una perturbación, además será muy difícil mantener el valor de la variable controlada, en el caso de que la capacitancia sea sumamente pequeña las perturbaciones se notarían aún mucho más y el proceso sería oscilatorio y muy sensible a cambios de estado.

- **Resistencia:** es una característica del proceso que prácticamente se opone parcial o totalmente a la transferencia de material o de energía entre las capacitancias existentes.
- **Tiempo muerto:** esta característica del proceso es el tiempo que transcurre desde que se realiza el cambio de la variable del proceso hasta que este cambio sea corregido por el control del sistema. (Instituto Argentino de Automación Industrial , 2010)

Al pasar el tiempo los tipos de control han ido aumentando y los existentes han ido mejorando, entregando así una mejor respuesta de control y con mayor precisión. El campo industrial cada vez requiere de mejoras continuas, es por esto que los tipos de control evolucionan desde los más primitivos hasta los más avanzados, de acuerdo con los requerimientos de los procesos, se establece que un control debe ser apto y que responda a las necesidades de cada variable manipulada, entregando así buena estabilidad y aumentando el tiempo de vida de los actuadores. (Rojano, 2014)

1.13. Estrategias de control

El objetivo del control es básicamente receptor señales medidas para realizar un conjunto de procedimientos, el cual ofrece una salida para controlar el proceso adecuadamente. Las estrategias de control definen la forma de la estructura o circuito que deben seguir las señales del lazo de control para entregar la señal que comandará a los actuadores. Para poder definir la estructura del control se debe tener conocimientos de las diferentes variables que se pretende manipular como ejemplo: nivel, flujo, temperatura, etc. (Morilla, 2007)

1.13.1. Control PID

El control proporcional integral derivativo (PID) es un mecanismo de control por realimentación que se usa en sistemas de control industrial, básicamente es un sistema que regula automáticamente, este control trata de aprovechar las varias ventajas de los controladores básicos que lo conforman, si la señal del error cambia lentamente en función del tiempo predomina la acción proporcional e integral y si el error varía rápidamente la acción predominante es la derivativa (**Figura 24**).

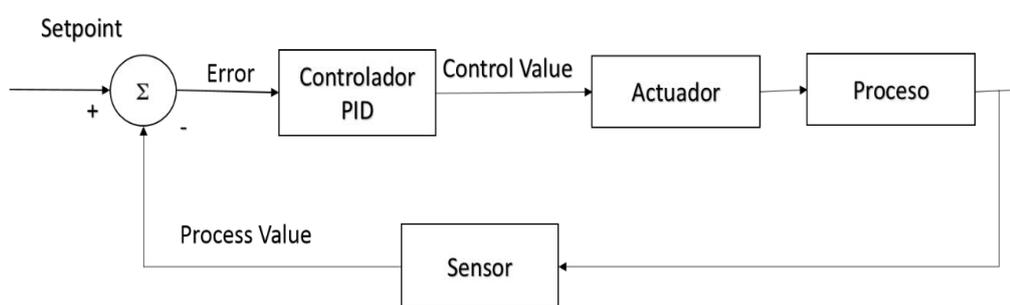


Figura 24: Lazo de Control Cerrado PID

Fuente: (Morilla, 2007)

Este tipo de control tiene la ventaja de entregar una respuesta rápida y a su vez la compensación de la señal para disminuir el error, en el caso que existan perturbaciones, este control realimentado reduce efectos de perturbaciones y hace que el sistema sea insensible a variaciones del proceso. La salida del control viene dada por la siguiente **Ecuación 1.1** en función del tiempo. (Morilla, 2007)

$$u(t) = Kp * e(t) + \frac{Kp}{Ti} * \int_0^t e(t) * dt + Kp * Td * \frac{de(t)}{dt} \quad (1.1)$$

Donde:

- Kp: Ganancia Proporcional.
- Ti: Tiempo Integral.
- Td: Tiempo Derivativo.

A continuación se detalla como interviene cada acción en el control PID:

- La acción proporcional entrega una señal de salida proporcional al error, la constante de proporcionalidad es ajustable. Existe un valor de esta constante en la que la salida del regulador entrega una oscilación, por seguridad esta oscilación no debe ser muy elevada.
- La acción integral entrega una salida que es proporcional al error acumulado, esta constante elimina o disminuye razonablemente el error en estado estable que es producido por la constante de proporcionalidad.
- La acción derivativa disminuye el error proporcionalmente a la velocidad en que este se produce, el valor no debe ser muy grande ya que existiría una gran inestabilidad en el sistema.

En la **(Tabla 19)**, se muestra cómo actúa el sistema según varía las constantes del controlador. (Morilla, 2007)

Tabla 19

Acciones de las constantes del Controlador PID

	K_p Aumenta	T_i Disminuye	T_d Aumenta
Estabilidad	Se reduce	Disminuye	Aumenta
Velocidad	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Error estado estacionario	No eliminado	Eliminado	No eliminado
Área de error	Se reduce	Disminuye hasta cierto punto	Se reduce

Fuente: (Morilla, 2007)

1.13.2. Control difuso

El control difuso se basa en expresiones ambiguas que formulan reglas para controlar el sistema. Estos sistemas difusos trabajan de manera diferente a los sistemas convencionales. Las aplicaciones de control difuso son más adecuados donde hay requerimientos cualitativos para una acción de control

satisfactoria en donde estos requerimientos son conocidos como reglas difusas, la implementación de este tipo de control se lo hace también ya en procesos industriales retroalimentados, en la **(Figura 25)**, se muestra como está conformado el controlador difuso. (Theler, 2007)

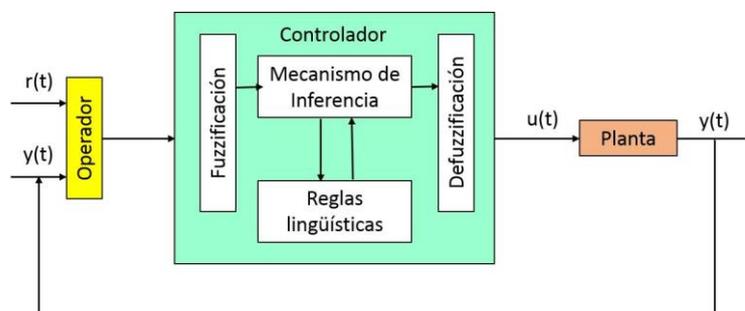


Figura 25: Partes que conforman al controlador difuso

Fuente: (Theler, 2007)

Para realizar este tipo de control se efectúa un procedimiento que trata de sintetizar las habilidades humanas del operador en base a reglas difusas y así desarrollar un sistema de control difuso. El resultado de definir bien las reglas hace de este un sistema de control inteligente, la popularidad de esta estrategia es el control de lazos simples, normalmente usando controladores PID, la lógica difusa copia la acción del controlador PID con algunas modificaciones para manejar el comportamiento no lineal, en la **(Figura 26)** se muestra como un control difuso puede reemplazar a un controlador convencional. (Pérez, 2011)

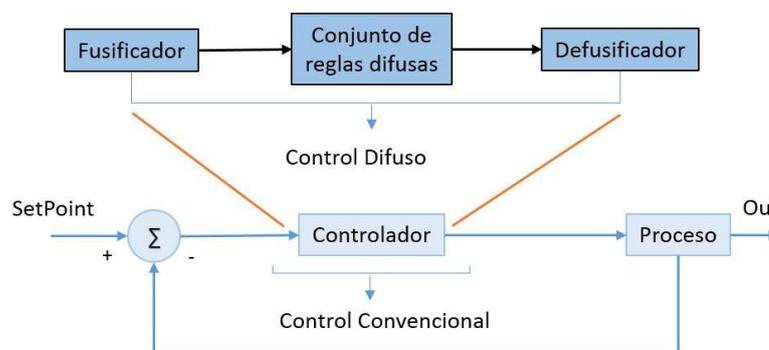


Figura 26: Controlador Difuso en un control convencional

Fuente: (Pérez, 2011)

El controlador difuso pretende realizar las acciones de un controlador tradicional usando reglas difusas y dando características para tratar con sistemas de propiedades especiales como pueden ser algunos comportamientos no lineales. Este controlador presenta las siguientes etapas:

- **Fusificación:** Tiene como objetivo convertir valores reales en valores difusos, aquí se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada en función a los conjuntos difusos previamente realizados.
- **Base del conocimiento o reglas lingüísticas:** Esta etapa almacena el conocimiento asociado con el dominio del sistema y los objetivos del control, aquí se definen las reglas lingüísticas del control, que posteriormente realizarán la toma de decisiones que decidirán la forma en la que el sistema debe actuar. (Ramírez, 2008)
- **Mecanismo de inferencia:** Este bloque relaciona los conjuntos difusos de entrada con la salida para representar las reglas que definirán al proceso o sistema, en este mecanismo se utiliza la información de las reglas lingüísticas para generar nuevas reglas mediante el uso de condiciones.
- **Defusificación:** Esta etapa final se encarga de transformar los valores difusos en valores reales, para finalmente ser utilizados en el proceso de control. En esta etapa se usan métodos matemáticos como por ejemplo: del centroide, del promedio ponderado y del medio máximo.

La gran ventaja del controlador difuso es que genera una eficiente y efectiva metodología para desarrollar en forma experimental un controlador no lineal sin usar matemática avanzada. El controlador no necesita explícitamente del modelo del proceso a controlar (función de transferencia). En muchas situaciones no lineales, el problema de control puede usualmente ser solucionado de manera más efectiva y eficiente que el control convencional.

Se puede trabajar tanto con sistemas SISO (simple entrada simple salida) como MIMO (múltiples entradas múltiples salidas) sin usar matemática

sofisticada, puesto que en la actualidad se cuenta con simuladores y métodos de prueba - error, adicional a esto el Difuso permite realizar control a procesos no lineales, siendo esta principal ventaja desde el punto de vista industrial. (Ramírez, 2008)

1.13.3. Control predictivo

El Modelo Predictivo es un método de control que ha ingresado en los últimos años en la industria como la mejor opción para controlar un proceso con múltiples entradas y múltiples salidas. En teoría el fundamento de esta estrategia se basa en fijar un horizonte de predicción N para el cual se van a predecir en cada instante k_i las salidas futuras. Esto se logra utilizando un modelo de predicción que describe el comportamiento de las variables del proceso a controlar y el cual reside en el controlador. Las predicciones dependen de los valores conocidos hasta el instante k_i y de las señales de control futuras. Para calcular las señales de control futuras se utiliza una función de costo que en el caso estándar es cuadrática y penaliza los errores entre la salida predicha y la trayectoria de referencia.

Generalmente, se suele incluir el esfuerzo de control en la función de costo cuadrática. El problema puede ser resuelto analíticamente en ausencia de restricciones pero en caso contrario se debe utilizar un algoritmo repetitivo de optimización. Para cualquiera de las dos alternativas la solución al problema devuelve un vector que contiene las acciones de control futuras, cuya dimensión depende del horizonte de control, sin embargo, solamente el primer elemento de este vector debe ser enviado a la planta. Este proceso se vuelve a repetir para cada instante k_i . En la **(Figura 27)** se indica La estrategia de Control Predictivo basado en Métodos (MPC) y la idea de algunos de los términos involucrados.

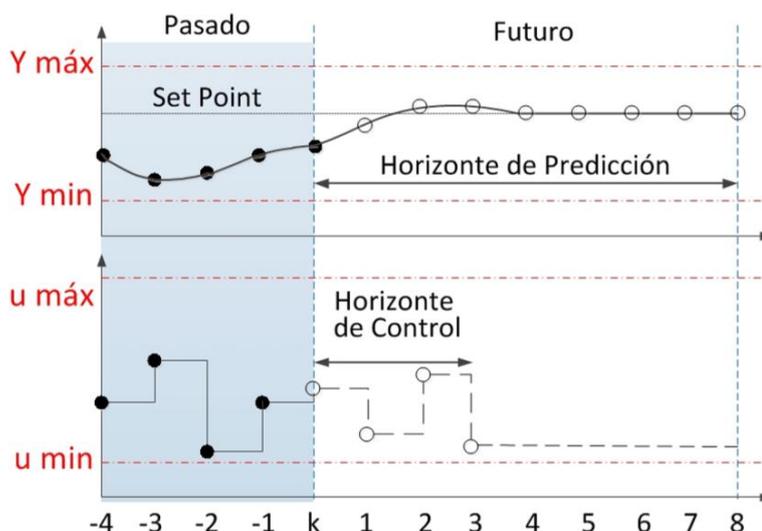


Figura 27: Idea del control Predictivo MPC

La Estrategia de control predictivo tienen elementos comunes que establecen un criterio de optimización y estos vienen definidos por:

1.13.4. Modelo de predicción

Se basa en un modelo, ya que con esto se puede obtener la dinámica del proceso y además de tener un entero conocimiento teórico del proceso. Las salidas futuras procesadas son predichas en el horizonte de predicción (H_p) utilizando un modelo del proceso. Los valores de las salidas predichas $y(k+1)$ dependen del estado del proceso en tiempo actual (k) y de las señales de entrada y salida pasadas; las señales de control $u(k+1)$ son predichas en el horizonte de control, donde H_c (horizonte de control) $\leq H_p$ (horizonte de predicción). La señal de control es manipulada solo en el horizonte de control y se mantiene constante a través del tiempo (**Figura 28**).

- Horizonte de Predicción: Es el intervalo de tiempo futuro que se considera en la optimización para la señal de control.
- Horizonte de Control: Número de movimientos calculados para cada variable manipulada, donde el horizonte de control es menor al horizonte de predicción. (Ortiz Guevara, 2011)

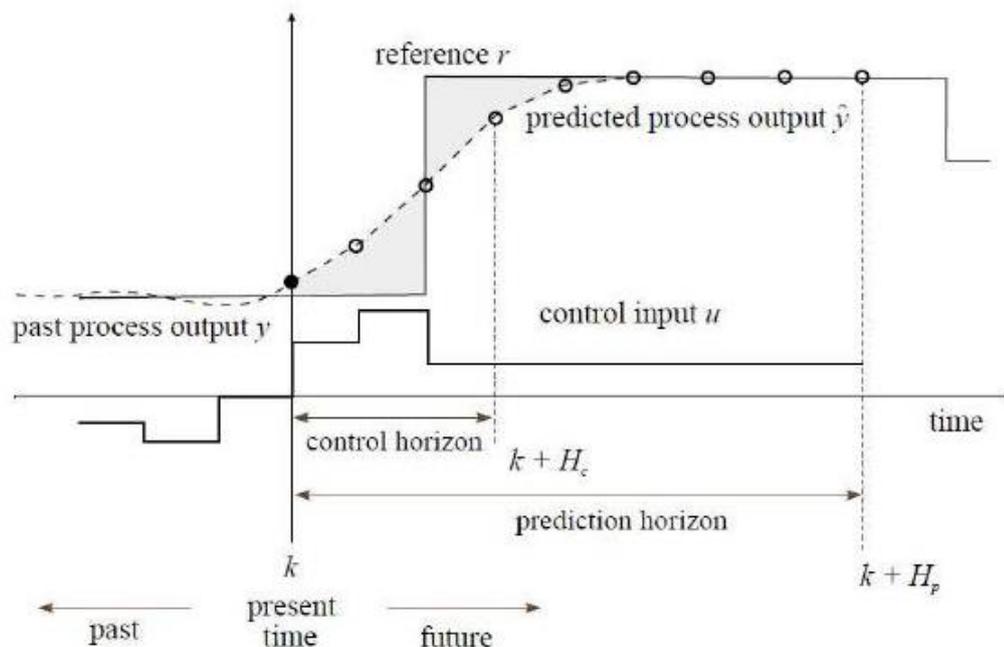


Figura 28: Horizonte de Control y Predicción

Para el control Predictivo la representación del modelo matemático (Función de transferencia) del proceso se las define de la siguiente manera **Ecuación 1.2.** Y **Ecuación 1.3.**

$$x(t + Ts) = Ax(t) + B u(t) + K e(t) \quad (1.2)$$

$$y(t) = Cx(t) + D u(t) + e(t) \quad (1.3)$$

1.13.5. Función objetivo

Conocida como función de costo, es aquella que indica el criterio a optimizar, es una función definida positiva que expresa el costo asociado a la evolución del proceso en el intervalo del horizonte de predicción N y viene definida por **Ecuación 1.4.** (Ortiz Guevara, 2011)

$$\begin{aligned}
J(k) = & \sum_{i=N_w}^{N_p} [\hat{y}(k+i|k) - r(k+i|k)]^T \cdot \mathbf{Q} \cdot [\hat{y}(k+i|k) - r(k+i|k)] \\
& + \sum_{i=0}^{N_c-1} [\Delta u^T(k+i|k) \cdot \mathbf{R} \cdot \Delta u(k+i|k)] \\
& + \sum_{i=N_w}^{N_p} [u(k+i|k) - s(k+i|k)]^T \cdot \mathbf{N} \cdot [u(k+i|k) - s(k+i|k)]
\end{aligned} \tag{1.4}$$

1.13.6. Ley de control

Para obtener los valores de la señal de control $u(k+1)$ es necesario minimizar la función de costo $J(k)$, pero antes se debe obtener las salidas predichas $y(k+1)$ en función de los valores actuales y pasados, tanto de la entrada como de la salida, de igual forma las señales futuras de control, mediante el uso del modelo escogido y reemplazando en la función de costo, obteniendo una expresión que al minimizar da como resultado los valores buscados. Al momento de minimizar, la ley de control produce una mejora en la robustez del sistema y consiste en que después de un intervalo donde el horizonte de control es menor al horizonte de predicción, la señal de control permanece constante. En esta estructura de la ley de control se aplica el uso del concepto de horizonte de control, que tras un cierto intervalo no existe variación en la señal de control aplicado, lo que equivale a dar pesos infinitos. (Ortiz Guevara, 2011)

1.14. LABVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un software dedicado al desarrollo basado en programación por medio de símbolos gráficos para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos. Posee integración para la comunicación con hardware GPIB, VXI, RS-232, RS-485 y tarjetas de adquisición de datos Plug-In. Además incorpora librerías para estándares de software como TCP/IP y ActiveX. Se puede destacar las siguientes ventajas (**Tabla 20**):

Tabla 20**Características de LabVIEW**

Características	
Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones, es intuitivo y fácil de aprender.	Integra funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
Flexibilidad, facilita cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.	El sistema está dotado de un compilador gráfico.
Da la posibilidad de crear soluciones completas y complejas.	Posibilidad de realizar programas con otros lenguajes escritos, pero la característica principal del software es la no utilización de líneas de texto para crear el código fuente del programa, ya que emplea la programación gráfica o lenguaje G para crear programas basados en diagramas de bloques.

Fuente: (Bustos, 2011)

LabVIEW posee gran cantidad de herramientas con las cuales se puede crear y ejecutar muchas aplicaciones ya sea de control, de automatización, robótica, etc. Además posee ToolKits que ayudan al usuario a realizar su proyecto, la National Instruments propietario de este software posee gran cantidad de dispositivos electrónicos que se usan con la interfaz de programación. Las acciones realizadas en el software son de gran factibilidad a la hora de ejecutar los requerimientos necesarios por el usuario. (Bustos, 2011)

1.15. TIA PORTAL

El Totally Integrated Automation Portal proporciona el entorno de trabajo para la programación del PLC SIEMENS y la TOUCH PANEL, siendo una herramienta de ingeniería que combina el SIMATIC STEP 7, SIMATIC WinCC y SINAMICS StartDrive dando como resultado una mayor eficiencia

para desarrollar proyectos de Automatización. Siendo un software con interfaz intuitiva para el usuario, completa transparencia de datos, el software facilita la etapa de diseño, puesta en marcha, operación, mantenimiento y hasta la actualización de soluciones de automatización (**Figura 29**). (SIEMENS, 2012)

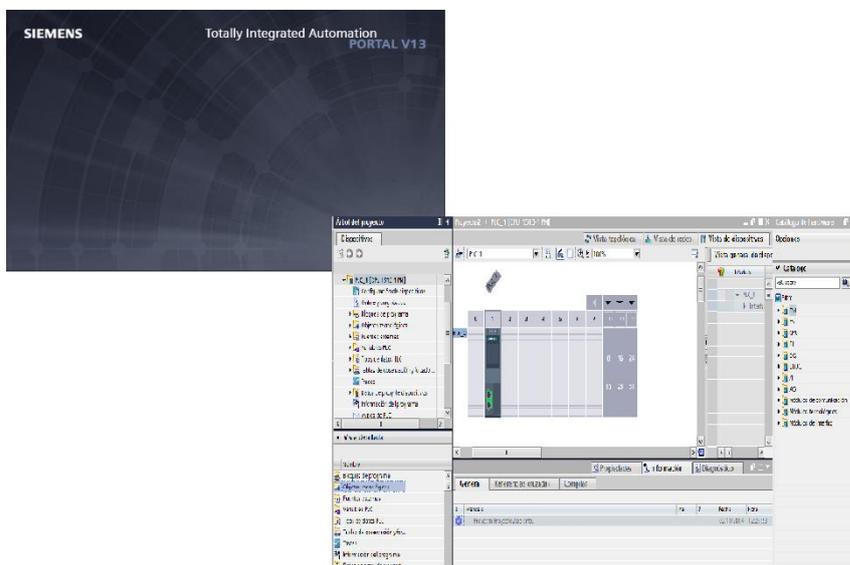


Figura 29: Software TIA

Fuente: (SIEMENS, 2013)

Características:

- Soporte para controladores S7-1500 y S7-1200.
- Capacidad de trabajar con varios desarrolladores en un mismo proyecto.
- Búsqueda automática de actualizaciones de software.
- Desarrollo de lenguajes de programación LAD, FBD, STL, SCL y gráfico.
- Una interfaz de usuario común para todas las tareas de automatización con servicios comunes (ej. Configuración, comunicación, diagnóstico).
- Base de datos única: Datos automáticos y consistencia.
- Potentes librerías con todos los objetos de automatización.
- Manejo simultáneo de todos los drivers de comunicación (**Figura 30**). (SIEMENS, 2012)

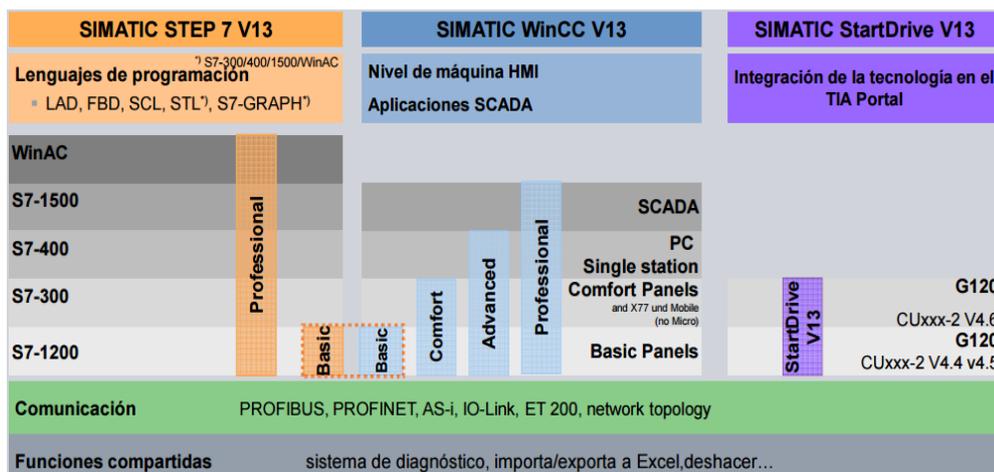


Figura 30: Visión General del Alcance SIMATIC

Fuente: (InfoPLC, 2014)

1.16. MATLAB

Es un programa de cómputo numérico, el cual posee varias funciones en base a cálculos y herramientas de ingeniería como el Control System Toolbox siendo un conjunto de rutinas para MATLAB que emplea diferentes herramientas de la teoría de control clásico para sistemas lineales. Se puede dividir este Toolbox en cuatro subgrupos:

- Funciones para definir modelos.
- Funciones para obtener la respuesta temporal.
- Funciones para obtener la respuesta en frecuencia.
- Funciones para el diseño de controladores. (Bianchi, 2011)

Control de System Toolbox proporciona algoritmos y aplicaciones estándar de la industria, para analizar de forma sistemática, el diseño y los sistemas de control lineal. Puede especificarse el sistema como una función de transferencia, espacio de estado, cero-polos-ganancia, o el modelo de respuesta en frecuencia. Aplicaciones y funciones, como respuesta al escalón y diagrama de Bode, permiten visualizar el comportamiento del sistema en el dominio del tiempo y dominio de la frecuencia. Con esta herramienta de MATLAB se puede ajustar los parámetros para sintonizar utilizando el ajuste del regulador automático de PID. (Bianchi, 2011)

1.16.1. Identificación de modelos lineales

El sistema de identificación de MATLAB permite apreciar en tiempo discreto y en tiempo continuo, funciones de transferencia con un número determinado de polos y ceros. En el caso de que se requiera un modelo de tiempo continuo de orden inferior en forma de polos y ceros, el ToolBox de MATLAB permite estimar modelos de procesos, que son funciones de transferencia simples (**Figura 31**). (MathWorks, 2015)

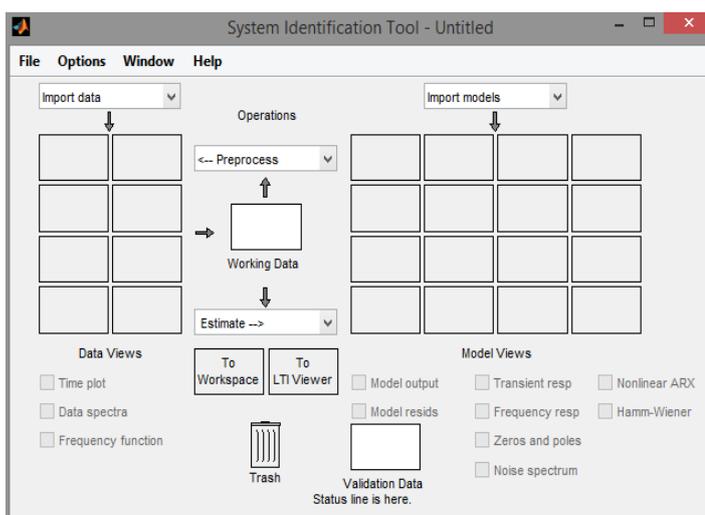


Figura 31: Comando Ident de MATLAB.

Fuente: (MathWorks, 2015)

CAPÍTULO II

2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN DE FLUJO

2.1. Introducción

El desarrollo de este capítulo se basa en el diseño e implementación de la estación de caudal, material de la tubería, conexión eléctrica del panel, diseño del vinil, instalación del transmisor Rosemount 8732E tipo brida, programación de la KTP-600, del PLC S7-1500 y el algoritmo en LabVIEW para obtener y enviar datos con la NI MYDAQ para visualizar y controlar el flujo de líquido que atraviesa por la tubería.

2.2. Especificación de requisitos del sistema

La estación de caudal posee un tanque de metal de forma cilíndrica de aproximadamente 25 Galones de capacidad, una llave manual para el paso del fluido desde el tanque hacia la bomba centrífuga THEBE de $\frac{1}{2}$ Hp, el material de la tubería es de acero galvanizado de tres cuartos, por requisitos del transmisor.

Para medir la variable flujo se utiliza un transmisor magnético Rosemount 8732E, el cual genera una señal estándar de 4 a 20 mA que va hacia el controlador, dependiendo de esto, el PLC o la DAQ envía una señal de control de 0 a 10V hacia el variador de frecuencia para manipular el fluido. La parte de control está centralizada en el PLC S7-1500 y la DAQ que se encuentran situado en la parte frontal del panel, estos dispositivos se encargan de mantener a la variable física dentro de los límites asignados por medio de métodos de control previamente programados.

Para una mejor apreciación y análisis de la variable frente a los diferentes métodos de control se hace necesario la visualización de esta, para ello se utiliza el display que viene integrado en el transmisor, un rotámetro de 0 hasta

40 litros por minutos (LPM), en el ordenador principal para el caso de la NI MYDAQ y del HMI programado en la TOUCH SCREEN, la cual permite visualizar en su totalidad el proceso, la configuración de los modos de control, modificar variables para su sintonización y avisos del sistema con respecto a los controles en el PLC. Adicionalmente el PLC debe ser capaz de realizar la gestión de comunicación e intercambio de datos con la TOUCH SCREEN. Los métodos de control serán puestos a prueba con respecto a la variación de la consigna, variación de la carga en la tubería para ello se instala una válvula manual, la cual simula perturbaciones dentro del proceso.

2.3. Diagrama del panel frontal

En la **(Figura 32)**, se muestra el boceto del panel frontal colocado en el módulo, dicha gráfica incluye la ubicación de todos los elementos que intervienen en el proceso de caudal, la misma que proporciona al estudiante una visualización didáctica para la manipulación y conexión.

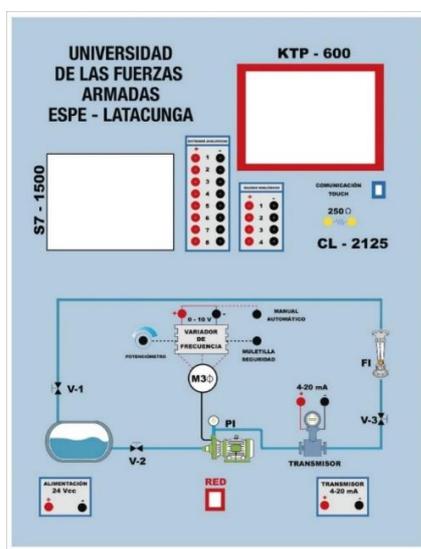


Figura 32: Diagrama del panel Frontal

2.4. Diagrama de bloques, flujo y P&ID del sistema

2.4.1. Diagrama de bloques

En la **(Figura 33)**, se indica en bloques el sistema de control de caudal de agua en lazo cerrado. La medición del estado de la variable se realiza

mediante el transmisor Rosemount 8732E el cual envía la señal de 4 a 20 mA hacia el controlador. Para realizar las acciones de control se usa un PLC SIEMENS S7-1500 o una DAQ quien mediante sus módulos de entradas y salidas analógicas permitirá obtener señales del transmisor y entregar la señal de control al variador de frecuencia, el mismo que enviará las acciones pertinentes a la bomba centrífuga; se implementa un HMI con una KTP-600, que representa el proceso en su totalidad y con opción a modificar los diferentes tipos de controles.

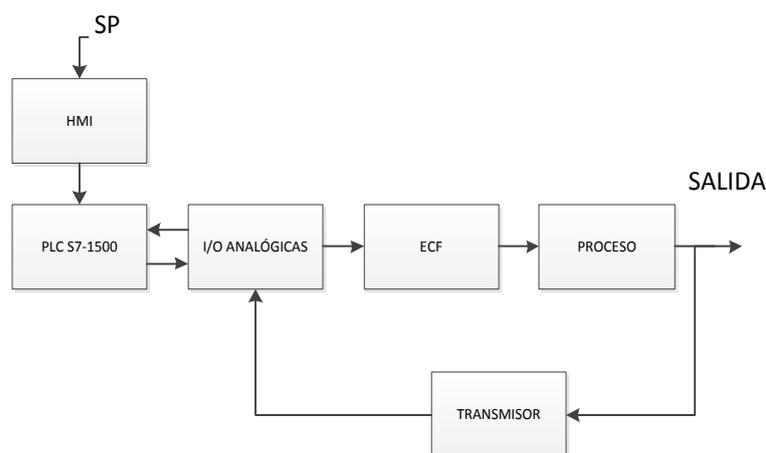


Figura 33: Diagrama de Bloques de la Estación

- HMI: Representa la Interfaz Humano Máquina (KTP-600 y pantalla del ordenador principal), donde el usuario podrá visualizar el proceso, tendencia y alarmas del proceso de caudal, también se podrá configurar las constantes de los controles y el valor del Set Point.
- Controlador: Es la base principal del sistema, encargado de realizar las funciones de control en lazo cerrado y gestiona la comunicación con el HMI del sistema.
- Módulos de Entradas y Salidas analógicas: Tanto las entradas como las salidas análogas son módulos del PLC y la DAQ, teniendo a disposición un módulo de 4 salidas y uno de 8 entradas analógicas, así proporciona un vínculo de comunicación entre la CPU del controlador y los dispositivos que reciben y entregan las señales para el proceso .

- ECF: El elemento de control final de caudal (Variador de Frecuencia) es el dispositivo que controla la velocidad de la bomba centrífuga de forma proporcional logrando cambiar el flujo de agua que circula por la tubería.
- PROCESO: Está representado por la bomba centrífuga, el rotámetro, las válvulas manuales y la conexión de la tubería que va desde y hacia el tanque de almacenamiento de agua.
- SENSOR: Es el elemento primario que se encuentra en contacto con la variable física que junto a un transductor convierte la señal del sensor a una señal eléctrica para posteriormente ser estandarizada y enviada al controlador.
- TRANSMISOR: Es el encargado de tomar el valor del sensor dado por la variable del proceso y transmitirla mediante una señal estándar de corriente específicamente de 4 a 20 mA.

2.4.2. Diagrama P&ID

En la **(Figura 34)**, se muestra el plano P&ID del sistema de caudal diseñado según las normas ANSI/ISA-S5.1

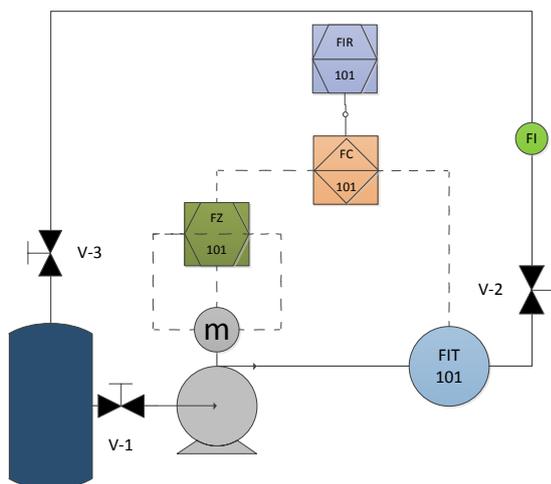


Figura 34: Diagrama P&ID de la Estación

- **TANQUE:** El proceso de caudal consta de un tanque reservorio de agua de forma cilíndrica 25 Galones, el mismo que marca el inicio y fin del sistema (Retroalimentado).
- **VÁLVULAS DE PASO MANUAL:** Las válvulas V-1, V-2 son de tipo bola mientras que V-3 es de tipo galleta, estos elementos están conectados en la tubería del proceso y tienen como objetivo provocar perturbaciones externas y dar mantenimiento del proceso.
- **BOMBA:** La bomba centrífuga trifásica marca THEBE de ½ HP, cumple la función de impulsión del agua para que recircule por la tubería.
- **INDICADOR DE FLUJO (FI):** Rotámetro graduado en galones por minuto y litros por minuto (GPM y LPM), tiene por objetivo visualizar físicamente el flujo de agua que circula por la tubería del proceso (verificación con el display del transmisor).
- **ELEMENTO PRIMARIO DE FLUJO (FE-101):** Sensor Rosemount de la serie 8700, es el elemento primario que se encuentra en contacto con la variable controlada y conectado al transmisor.
- **TRANSMISOR INDICADOR DE FLUJO (FIT-101):** Transmisor de flujo Rosemount 8732E, instrumento que convierte la señal del sensor de flujo en una señal estándar de 4 a 20 mA.
- **CONTROLADOR DE FLUJO (FC-101):** PLC SIEMENS S7-1500 y el ordenador principal encargados de controlar el proceso de caudal mediante un algoritmo preestablecido, el PLC adicionalmente realiza la comunicación con la TOUCH.
- **ELEMENTO DE CONTROL FINAL DE FLUJO (FZ-101):** Variador de frecuencia DELTA VFD-E, es el dispositivo que está encargado de variar la velocidad de la bomba centrífuga trifásica logrando así controlar el flujo que atraviesa por la tubería.
- **REGISTRADOR INDICADOR DE FLUJO (FIR-101):** La TOUCH PANEL KTP-600, se encarga de mostrar todo el proceso completo, configurar el modo de control del proceso, así como cambiar valores del Set Point, monitorear todas las variables y visualizar registros de cada una, la pantalla se encuentra accesible al operador.

2.4.3. Diagrama de flujo

La (Figura 35), muestra el esquema de flujo del proceso de caudal, en donde se ilustra el flujo de información y procesamiento, mismas que se detallan a continuación.

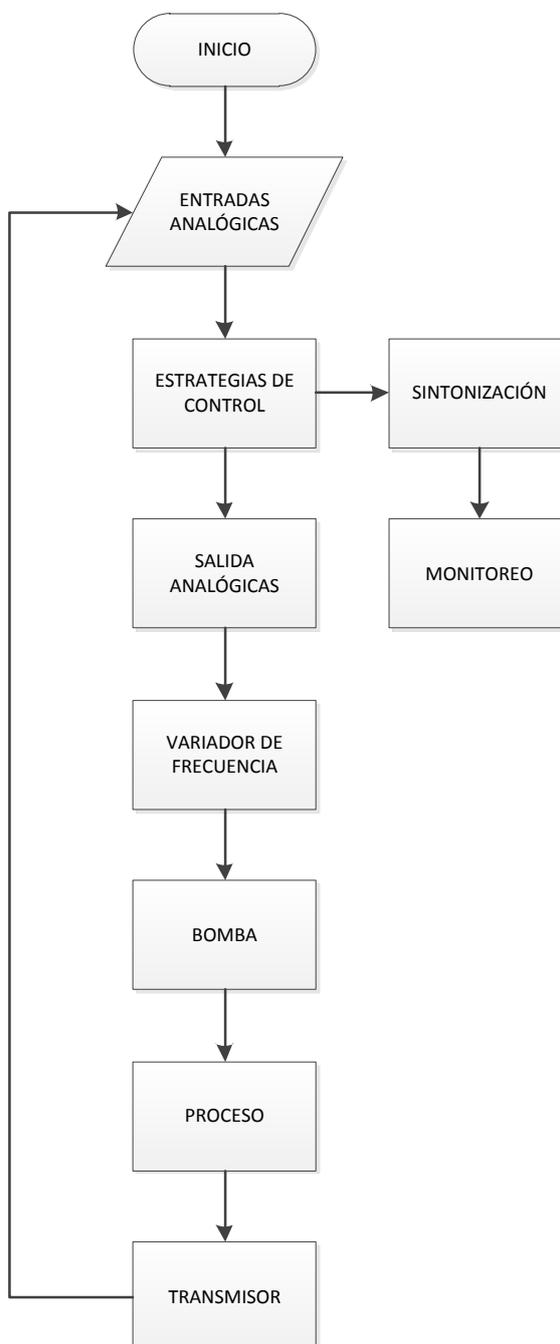


Figura 35: Diagrama de flujo de la estación

2.4.4. Diagrama de flujo del HMI

La (Figura 36), indica las operaciones que se ejecutan en la TOUCH PANEL (KTP-600).

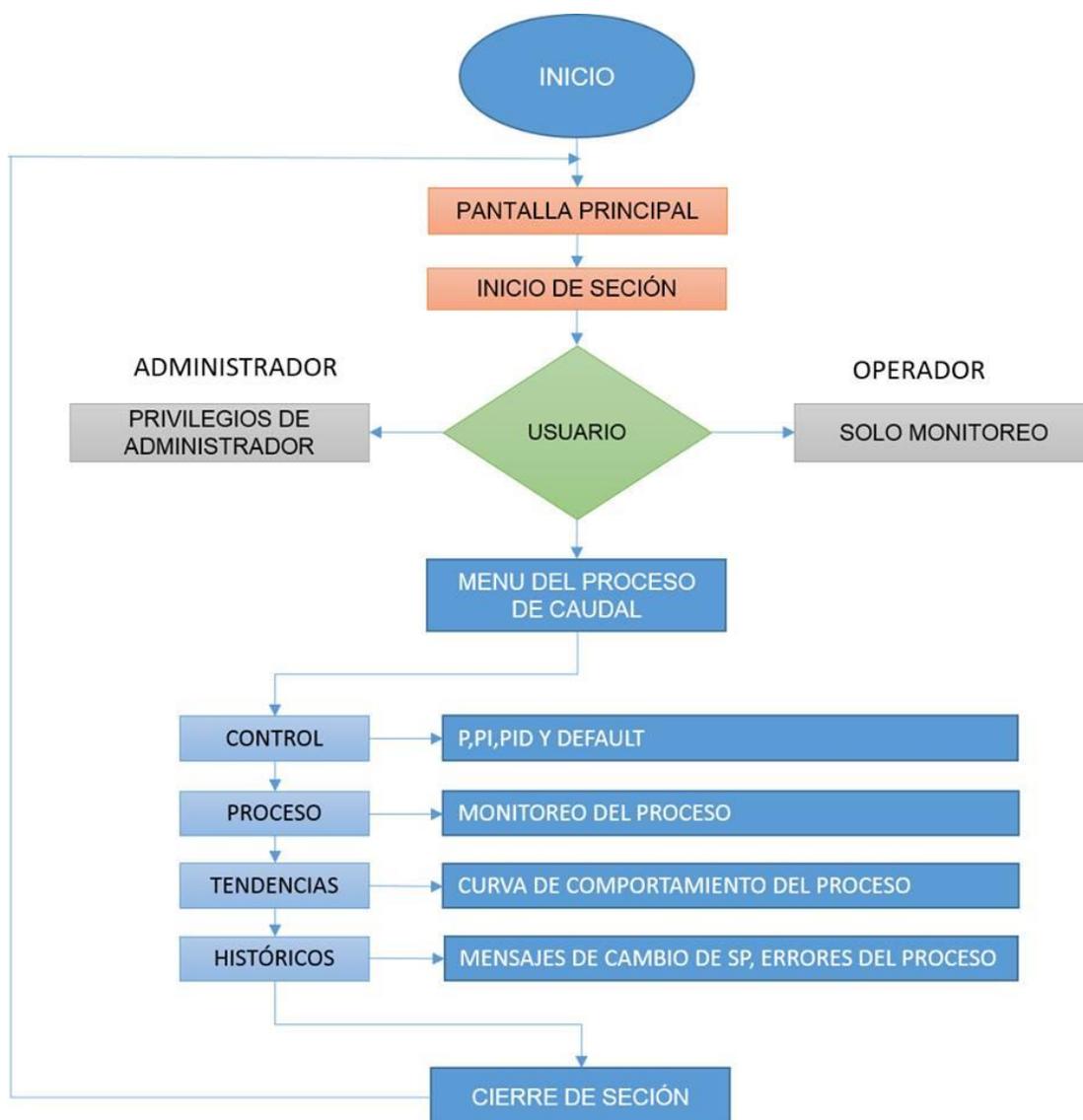


Figura 36: Diagrama de flujo del HMI

2.4.5. Diagrama de flujo en LABVIEW

La (Figura 37), muestra el diagrama de flujo de los VIs creados en el proyecto de LabVIEW para analizar y comparar los métodos de controles tradicionales y avanzados.

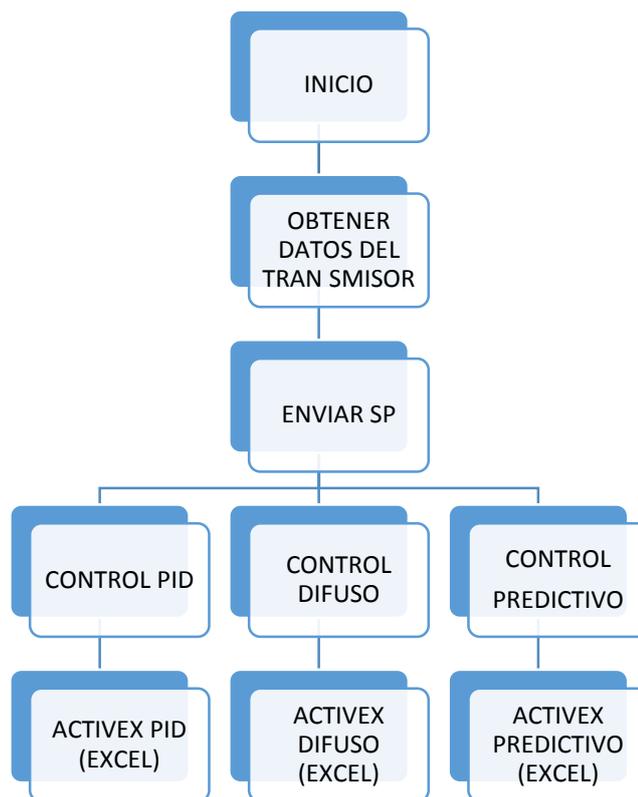


Figura 37: Diagrama de flujo LabVIEW

2.5. Instalación del transmisor magnético de flujo Rosemount 8732E

El montaje físico del transmisor es similar a la instalación de un tramo típico de tubería. Se requieren herramientas, equipo y accesorios convencionales (pernos, empaquetaduras y accesorios de puesta a tierra).

2.5.1. Ubicación del transmisor Rosemount 8732E

Para que el transmisor garantice la precisión de la media es necesario instalarlo a una distancia mínima de cinco diámetros de tubería recta aguas arriba y dos diámetros de tubería recta aguas abajo, con respecto al electrodo. Al tener tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada las dimensiones se especifican a continuación (**Figura 38**).

$$\text{Aguas arriba: } \frac{3}{4} * 5 = 3,75 \text{ pulgadas} = 9,52 \text{ cm}$$

$$\text{Aguas abajo: } \frac{3}{4} * 2 = 1,5 \text{ pulgadas} = 3,81 \text{ cm}$$

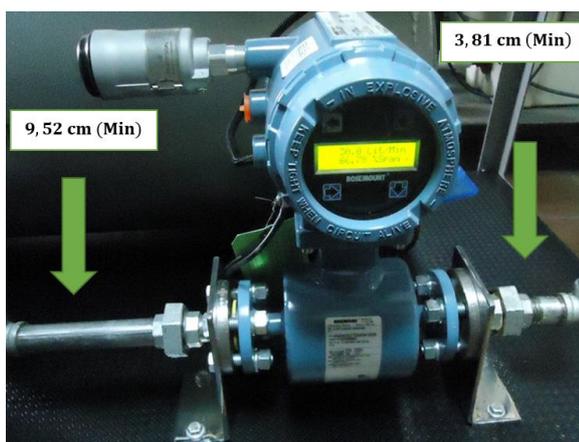


Figura 38: Instalación del transmisor 8732 E en la Estación de Flujo

La posición del sensor debe garantizar que permanezca lleno durante su uso, la **(Figura 39)** muestra las posiciones más óptimas de ubicación del instrumento para minimizar los efectos del gas atrapado.

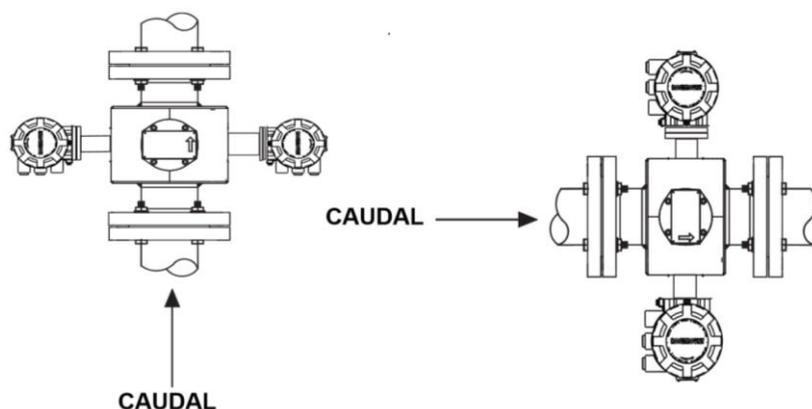


Figura 39: Posiciones correctas de instalación del Transmisor

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

Para la estación de caudal se optó por una posición horizontal, puesto que es una sección de tubería baja que se encuentra normalmente llena, es necesario orientar el plano del electrodo a no más de 45 grados respecto a la horizontal, puesto que al superar este valor se podría hacer que un electrodo sea más susceptible a ser aislado por el aire o el gas atrapado en la parte superior del sensor **(Figura 40)**.



Figura 40: Posición horizontal de estación

2.5.2. Instalación tipo brida

Para la instalación se requiere de empaques en cada una de sus conexiones con los equipos o tuberías adyacentes. Para la selección de la empaquetadura se debe tomar en cuenta el fluido del proceso y las condiciones de operación. El material de la empaquetadura seleccionado debe ser compatible con el fluido del proceso y con las condiciones de funcionamiento, para el proceso se utilizó tipo metálicas, cabe resaltar que se debe tener, ya que una mala manipulación de estos elementos puede dañar el revestimiento del transmisor (**Figura 41**).

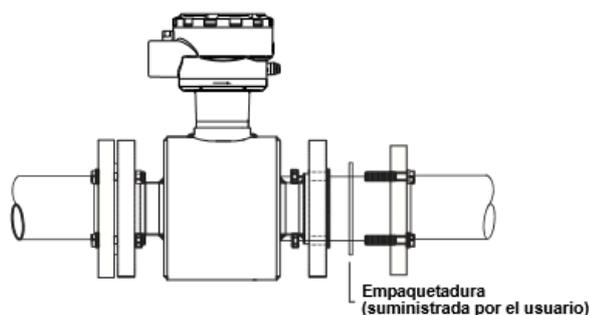


Figura 41: Instalación del sensor con la junta

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

Para la instalación del sistema bridado se realizó los siguientes pasos, descritos a continuación (**Tabla 21**).

Tabla 21

Pasos de instalación del transmisor tipo brida

	Brida	Junta	Tornillo
Selección	Brida apropiada para la aplicación según el estándar	-Usar junta de calidad -Para juntas en plancha no usar compuestos de unión. -Para juntas blandas, elegir el espesor adecuado	Elegir el tornillo necesario para ejercer la carga adecuada sobre la brida/junta. -Suficiente ductilidad -Tuercas con una carga de prueba un 20% mayor -Usar siempre arandelas
Preparación Inicial	Limpiar las superficies de asentamiento de la junta con cepillo de alambre y un mandril de latón	Cortar la junta, asegurarse que el tamaño sea el correcto , no reutilizar las juntas	Limpiar los tornillos, tuercas, arandelas con un cepillo de alambre para eliminar la suciedad
Almacenar Manipular		-En un lugar fresco y seco en forma horizontal y sacarlas de su envoltorio sólo cuando van a ser utilizadas -No doblarlas, torcerlas, o dañar su superficie	
Inspección Visual	Comprobar que la superficie de asentamiento no posea muescas radiales o deformaciones	Comprobar que la junta posea el tamaño y espesor correcto	Compruebe que las roscas no tienen defectos como rebabas o grietas
Lubricación		No usar compuestos de unión con juntas en plancha	Lubricar consistente y uniforme las roscas de los tornillos y las superficies de soporte, usar lubricantes aprobados.
Instalación	Asegurarse de que las superficies de acoplamiento son paralelas	Insertar con cuidado la junta entre las bridas: -Asegurarse de que la junta está centrada en la brida	
Ajuste			-Apretar las tuercas a mano al inicio -Usar el patrón de apriete cruzado -Usar llave dinamométrica -Mínimo de 5 vueltas

Fuente: (ROUSEMOUNT, 2010)

2.6. Diagrama e instalación eléctrica del panel de la estación

En la instalación eléctrica del panel se debe tener en cuenta parámetros para el dimensionamiento de los elementos, en esta sección se describe el circuito y los componentes que lo constituyen.

2.6.1. Elementos que intervienen en el panel

Los elementos que intervienen en el circuito se describen en la siguiente (Figura 42).



Figura 42: Elementos del panel de control

a. **Fuente SIEMENS Logo de 24 voltios:** La fuente tiene que poseer la capacidad para alimentar a la pantalla KTP-600:

- Referencia = 6EP1332-1SH43.
- Voltaje Salida= 24V.
- Rendimiento con valor nominal = 2,5A.
- Grado de protección = IP20.

b. **Disyuntores:** Funcionan como interruptores que se accionan por el calor, cuando una corriente demasiado intensa recorre un circuito debido a una falla de un equipo eléctrico o en el caso de una sobrecarga, el calor en el circuito excede la clasificación de carga del disyuntor y se dispara, apagando la energía eléctrica.

Para el cálculo de los disyuntores es necesario revisar todas las cargas de los elementos que estén sometidos a proteger para este caso se tiene:

- Suma total de consumo de los elementos 13,3 A.
- Disyuntor General = $13,3 \text{ A} * 1.25 = 16,62 \text{ A}$.
- Disyuntor Fuente Logo = $8 \text{ A} * 1.25 = 10 \text{ A}$.
- Disyuntor PLC = $2,5 \text{ A} * 1.25 = 3,12 \text{ A}$.

c. Fusibles: La función principal en los circuitos eléctricos es evitar sobrecargas, donde se tiene:

- Fusible General = $13,3 \text{ A} * 1,8 = 23,94 \text{ A}$
- Fusibles del Transmisor = $1 \text{ A} * 1,8 = 1,8 \text{ A}$

d. Variador Delta: Para su selección es necesario verificar los rangos de corriente, voltaje y frecuencia tanto del variador como del motor. Es pertinente verificar el desempeño de la aplicación con sobrecarga esto se logra mediante la manipulación de las válvulas manuales, el dispositivo debe ser capaz de limitar rápidamente corrientes superiores al 150% de corriente nominal del motor.

$$1.8 \text{ A} * (150\%) = 4,5 \text{ A Máximo}$$

Un factor muy importante para la instalación es la distancia entre el variador y el motor puesto que si supera los 100 m se requiere de factores de corrección o la instalación de un reactor de salida para reducir la carga del convertidor. Adicional a esto se debe tener en cuenta condiciones ambientales tales como la temperatura ambiente y la altura sobre el nivel del mar, los datos se describen a continuación. Latacunga está a 2850 metros sobre el nivel del mar (msnm), con una temperatura media anual de 12° C.

e. Bomba centrífuga: Los datos que son necesarios para la selección de la bomba centrífuga son:

- Potencia (HP)= $\frac{1}{2}$ HP
- Tensión nominal (V)= 220V
- Frecuencia nominal (Hz)= 60HZ
- Corriente nominal (A)= 1.80 A
- Velocidad nominal (rpm)= 3480 rpm

f. Relé: Es usado para el cambio de control del proceso: de manual a automático y viceversa, su salida viene conectada a la entrada analógica del variador de frecuencia. Para la selección del relé se referencia el número de entradas necesarias, para ello se usó cuatro entradas diferentes dos por cada señal, la de control manual y la del control automático.

g. Contactor: Se encarga del encendido y apagado de la estación, al momento de energizar la bobina del contactor esta cambia la posición interna de sus contactos para permitir el paso de las tres líneas de alimentación.

2.7. Conexión de entradas y salidas analógicas del PLC S7-1500

La conexión de las entradas y salidas analógicas del PLC S7-1500 sirven para adquirir la señal que entrega el transmisor y enviar voltaje de 0 a 10V hacia el variador de frecuencia.

2.7.1. Conexión de la entrada analógica de corriente

La conexión que se realiza será para un transductor de medida a 4 hilos, para ello en el módulo de entradas analógicas debe estar conectado de la siguiente manera en el canal cero (CH0) como se muestra en la **(Figura 43)**.

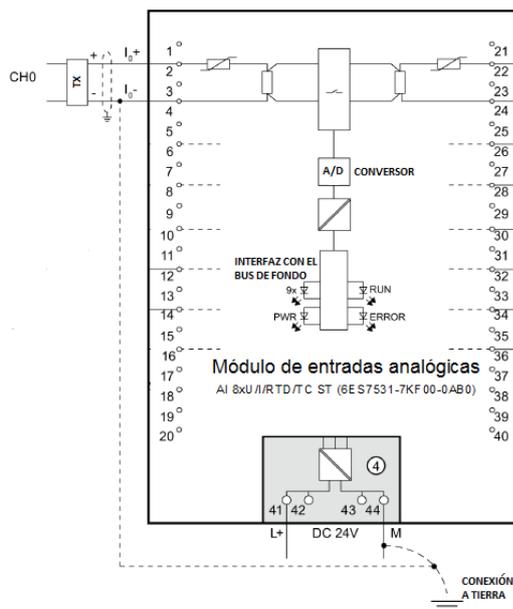


Figura 43: Conexión de la entrada analógica de corriente

Fuente: (SIEMENS, 2014)

2.7.2. Conexión de la salida analógica de voltaje

La conexión que se realiza en este módulo es para una salida de voltaje analógico en el rango de 0-10 V, este voltaje será la variable de control que está conectada al variador de frecuencia. El módulo de salidas analógicas está conectado de la siguiente manera en el canal cero (CH0) como se muestra en la (Figura 44).

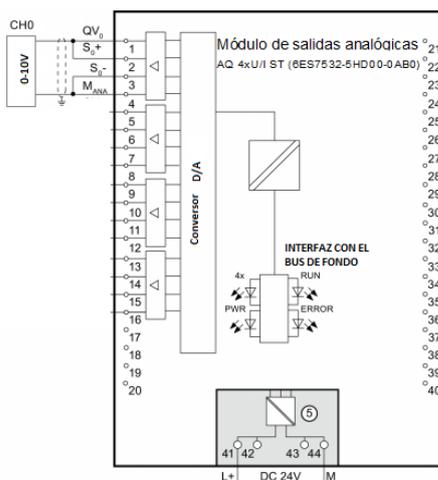


Figura 44: Conexión de la salida analógica de voltaje

Fuente: (SIEMENS, 2014)

2.8. Programación y configuración del PLC y la TOUCH PANEL

Para la programación y la correcta configuración del PLC S7-1500 se utiliza el software TIA PORTAL (Totally Integrated Automation), además sirve para la creación del HMI en la TOUCH, el software permite la integración de todos estos equipos de una manera sencilla y flexible.

2.8.1. Programación del PLC

A continuación se detalla el uso del TIA PORTAL para desarrollar el programa del control automático de la variable caudal, las configuraciones y parámetros adecuados que se debe tomar en cuenta en el PLC Siemens S7-1500.

2.8.2. Creación de un nuevo proyecto en el TIA PORTAL

El proyecto en el software TIA PORTAL, guarda el programa, las configuraciones, datos necesarios para el usuario, bloques de programación y objetos de los dispositivos asociados al PLC de una manera sistemática. A continuación se detallan los pasos para iniciar un proyecto nuevo en TIA PORTAL.

1. Ejecutar el software TIA PORTAL V12.



Figura 45: Ejecución del software TIA PORTA V12

2. Establezca un nuevo proyecto con su nombre y dirección que desee guardarlo.



Figura 46: Ventana para crear un nuevo proyecto

3. Una vez creado el proyecto, proceder a configurar un nuevo dispositivo. Este dispositivo será la CPU con el cual se va a trabajar.

2.8.3. Agregar y configurar un dispositivo

1. Dirigirse a la opción configurar un dispositivo

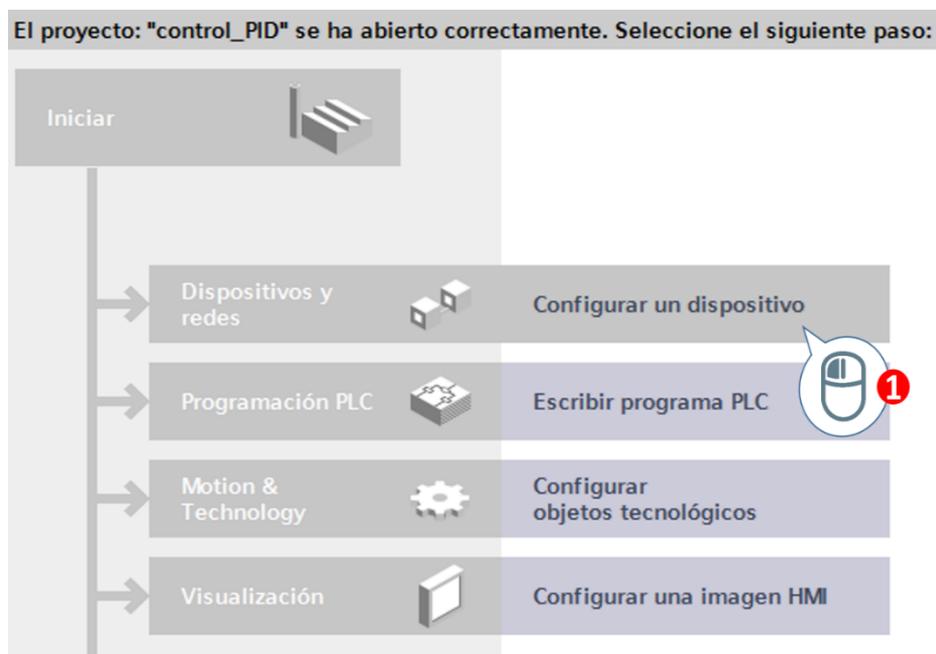


Figura 47: Agregar un dispositivo

2. Seleccionar el controlador a ser usado en el proyecto, para este caso un SIMATIC S7-1500 CPU 1511-PN.

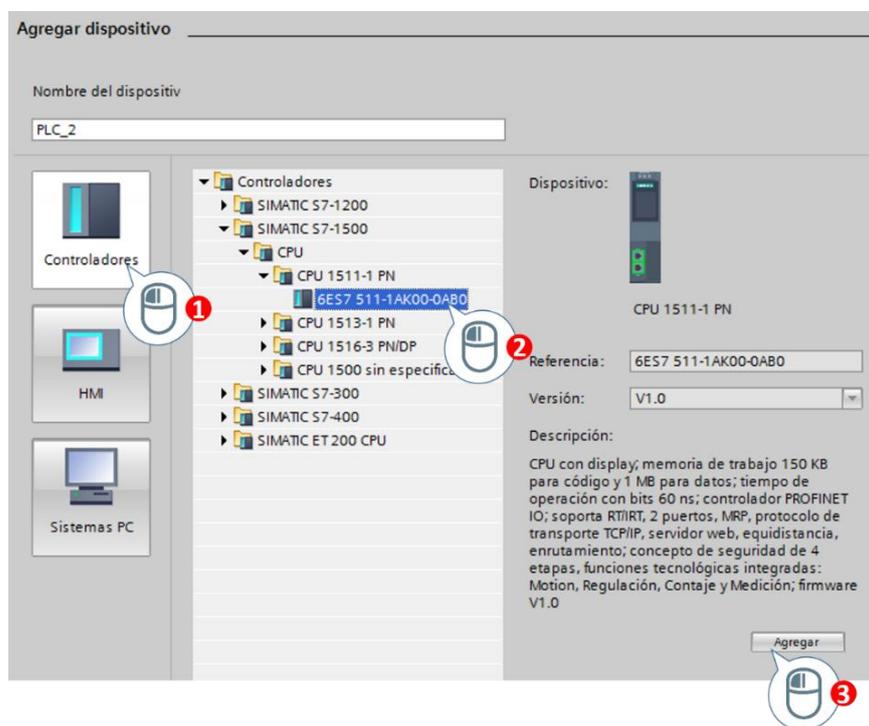


Figura 48: Selección de la CPU del controlador

3. Una vez creado el proyecto se ejecuta una ventana de configuración de dispositivos y redes, en esta ventana se agrega los módulos que están conectados externamente a la CPU del PLC y su fuente de alimentación.

2.8.4. Selección de los módulos del PLC

Agregar al proyecto los módulos que están conectados externamente a la CPU del PLC, dirigirse a la ventana, “catálogo de hardware” y seleccionar los siguientes dispositivos.

1. Fuente de energía PM 190W 120/230 VAC.
2. Módulo de salidas analógicas AQ 4xUI/I ST.
3. Módulo de entradas analógicas AI 8xUI/I/RTD/TC ST.

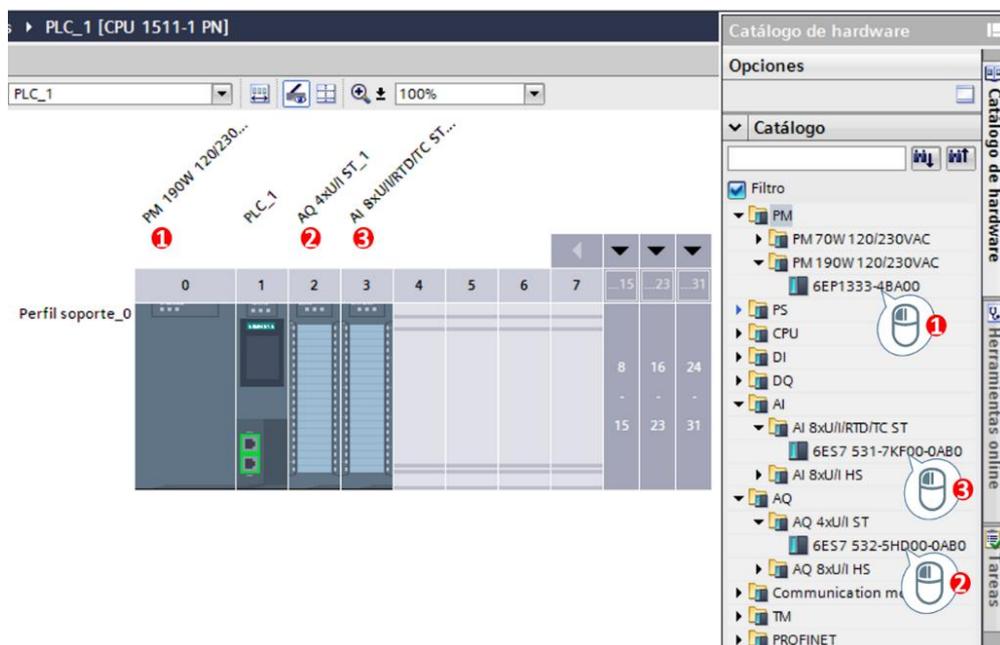


Figura 49: Selección de módulos del PLC

2.8.5. Configuración de la interfaz Profinet del controlador

1. Abrir la ventana de propiedades de los puertos PROFINET del PLC.

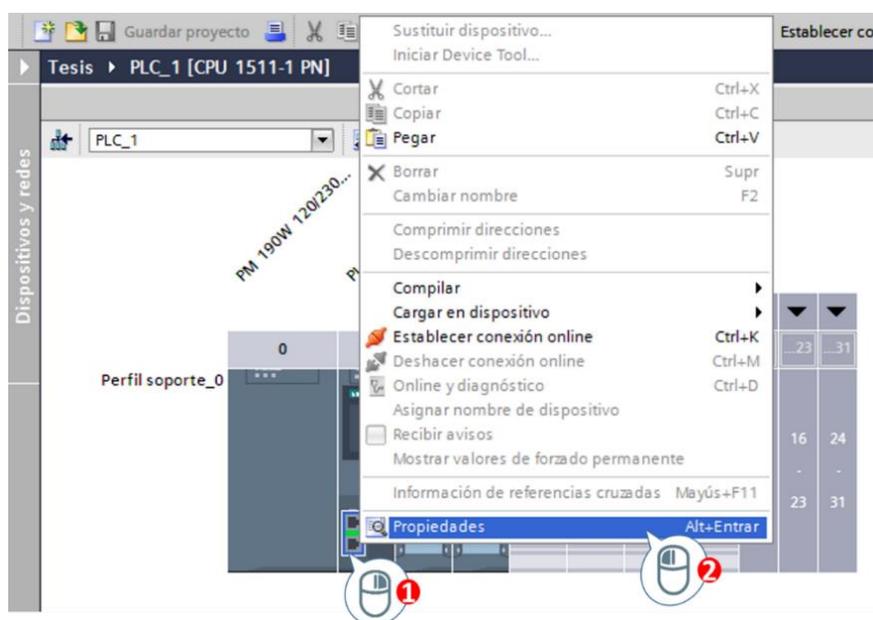


Figura 50: Acceso a las propiedades de la interfaz PROFINET

2. Ingresar la dirección IP del controlador en la ventana de Direcciones Ethernet.

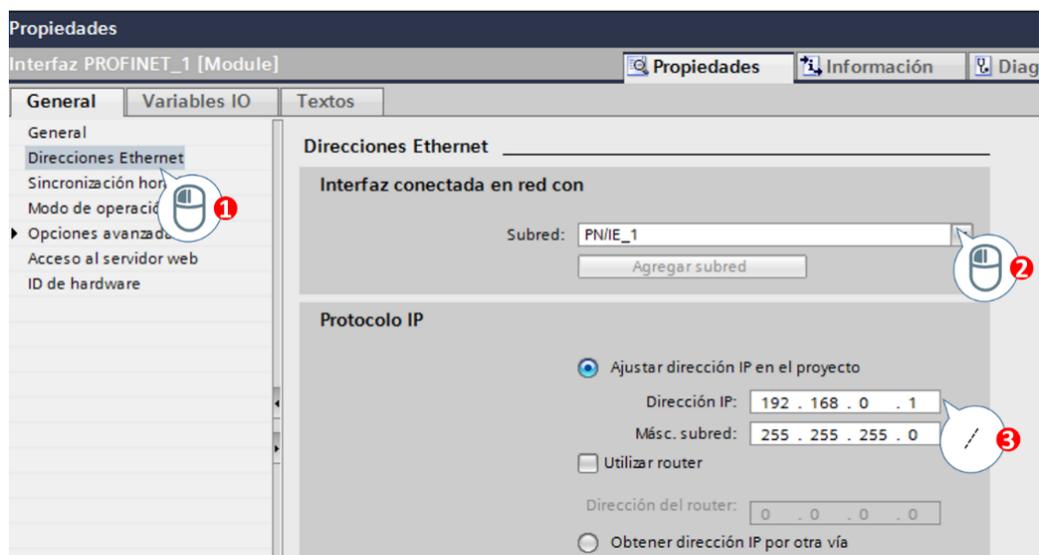


Figura 51: Propiedades de la interfaz PROFINET

2.8.6. Configuración de los módulos de entradas y salidas

La configuración tanto del módulo de salidas análogas como el de entradas debe realizarse según los requerimientos del proceso. Asignar a cada módulo su función detallada y configurar el canal apropiado de cada módulo. Para este proyecto se utiliza un canal por módulo, uno para el de entrada de corriente de 4-20mA y el otro para la salida de 0-10Vcc.

a. Configuración del módulo de salidas analógicas

1. Abrir las propiedades del módulo de salidas analógicas.

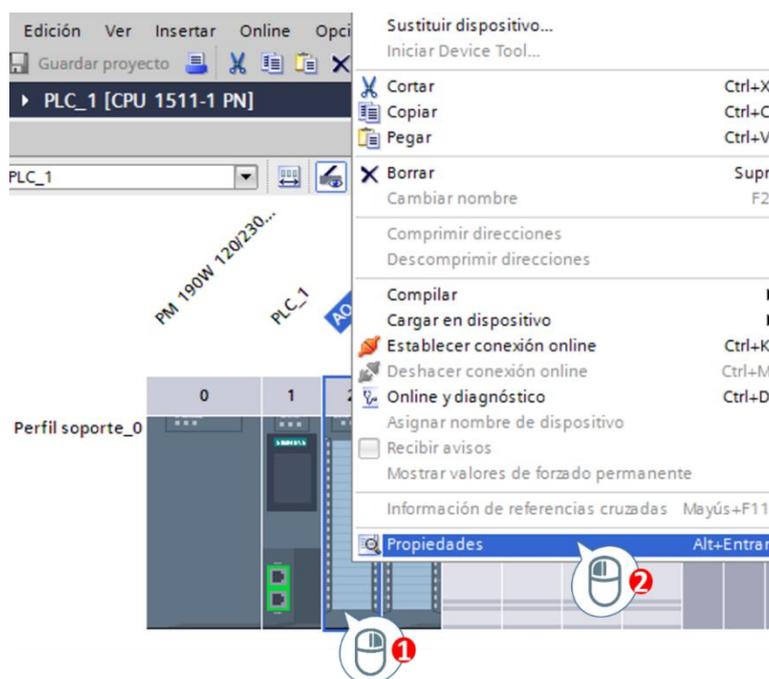


Figura 52: Acceso a la configuración del módulo de salidas analógicas

2. Ingresar las características de salida del módulo, se configura una salida de tensión de 0-10 voltios continuos en el canal 0 del módulo.

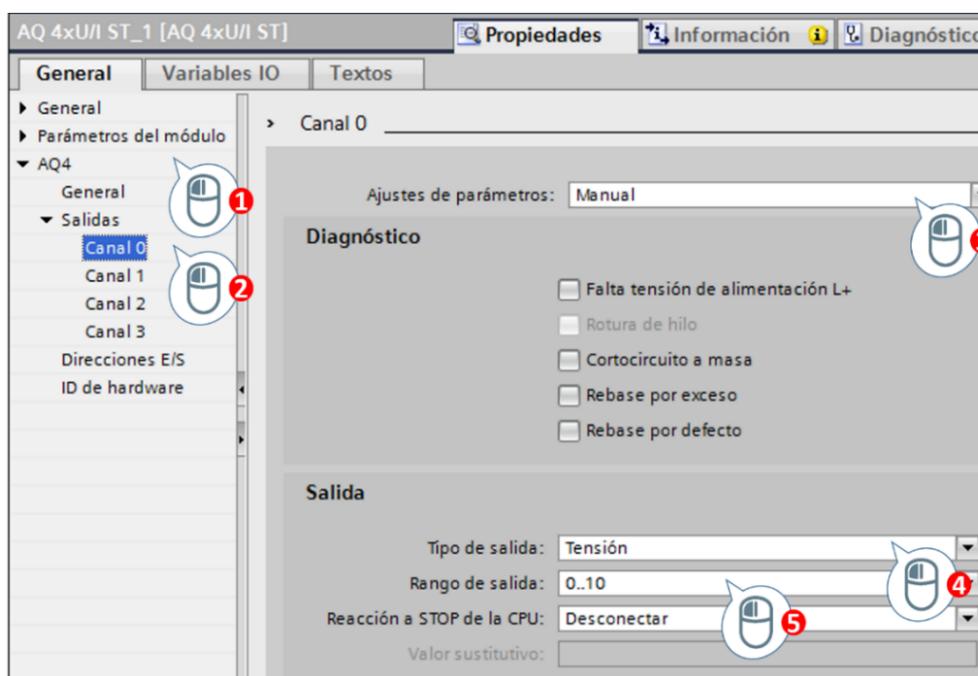


Figura 53: Propiedades generales del módulo de salida analógica

3. Asignar la dirección inicial del registro en el cual se escribirá el dato de salida.

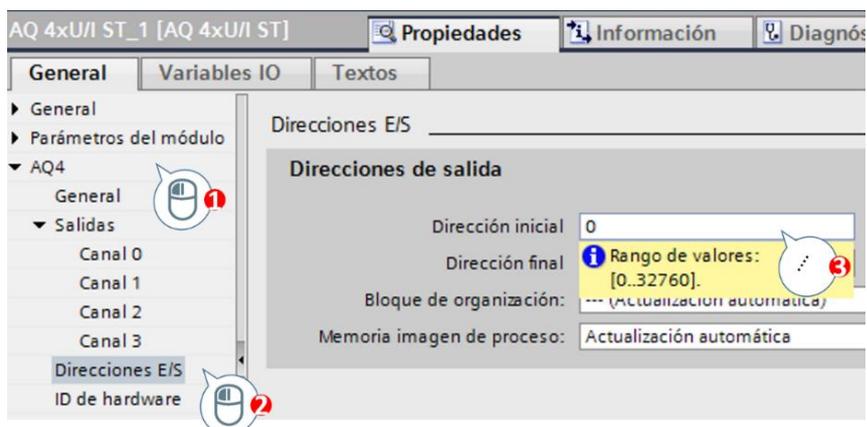


Figura 54: Dirección inicial del dato de salida

b. Configuración del módulo de entradas analógicas

1. Abrir las propiedades del módulo de entradas analógicas.

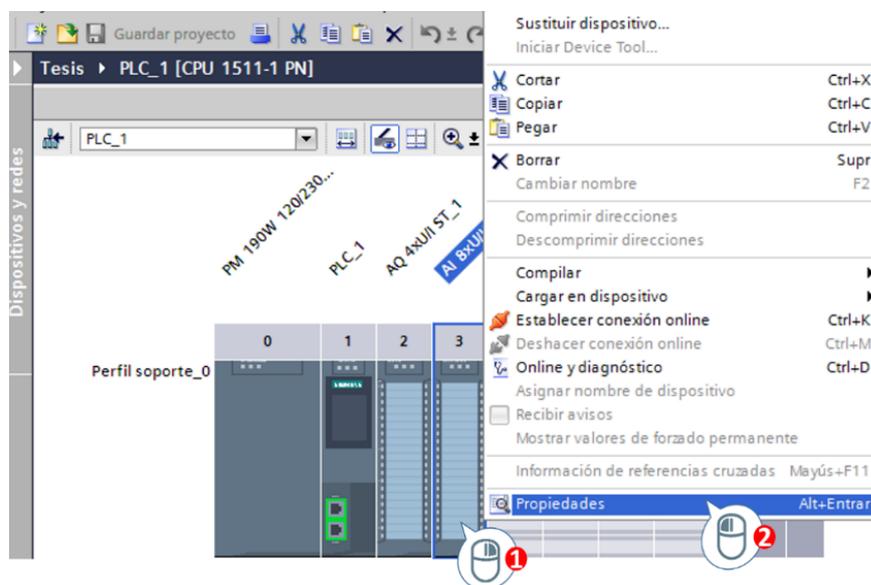


Figura 55: Acceso a la configuración del módulo de entradas analógicas

2. Seleccionar las características de entrada del módulo, para este proceso se selecciona una entrada de intensidad de 4-20mA que entrega el transductor a 4 hilos (ROSEMOUNT 8732E).

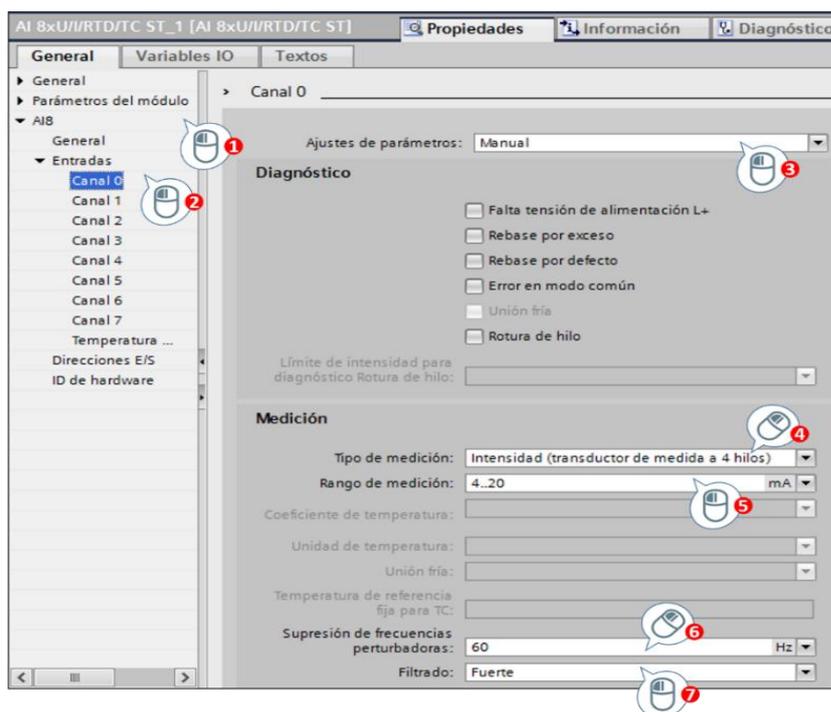


Figura 56: Propiedades generales del módulo de entradas analógicas

3. Asignar la dirección inicial del registro en el cual se almacena el dato de entrada.

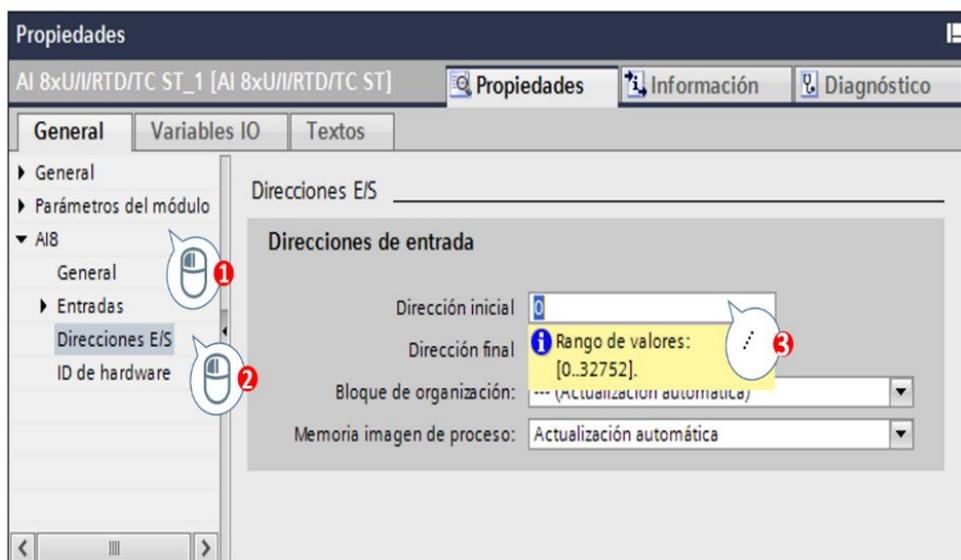


Figura 57: Dirección inicial del dato de salida

2.8.7. Cargar la configuración en la CPU del PLC

1. Una vez realizado la configuración de los módulos de entradas y salidas analógicas, cargar todos los parámetros en la CPU del PLC.

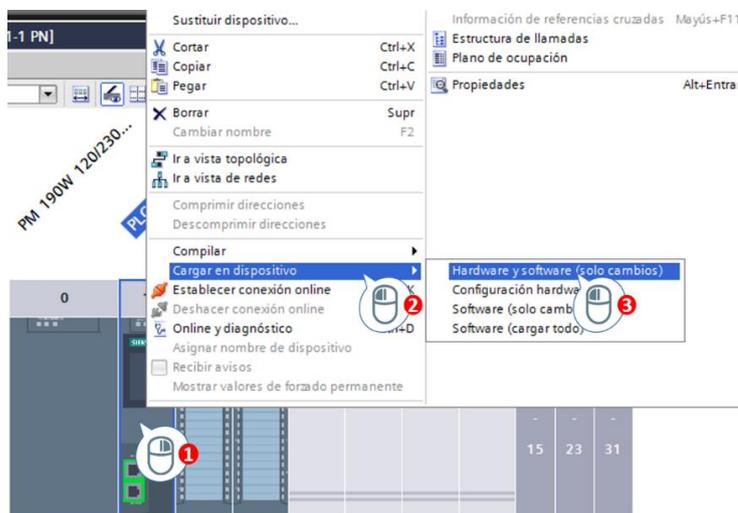


Figura 58: Cargar configuración en el dispositivo

- Clic derecho sobre la CPU del PLC.
- Opción cargar en dispositivo.
- Clic izquierdo en Hardware y software (solo cambios).

2. Verificar la correcta configuración de los módulos.

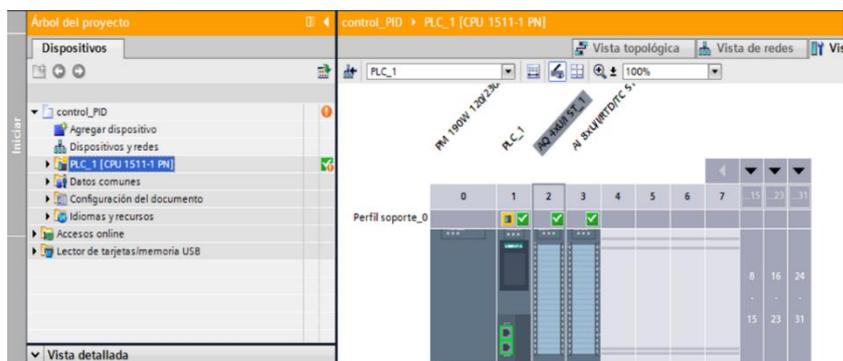


Figura 59: Estado de los módulos asociados a la CPU

Una vez cargado los parámetros de configuración y sin ningún error, establecer una conexión online para verificar que el proyecto reconozca, la fuente, los módulos de entradas y salidas analógicas conectados a la CPU del PLC. Los vistos en color verde representan que la conexión se realizó con éxito y que no hay ningún problema para utilizar los módulos.

2.9. Programación del PID en PLC SIEMENS S7-1500

Conjuntamente con el proyecto creado, se crea automáticamente un bloque de organización “Main [OB1]”. En este bloque se realiza la programación requerida por el usuario.

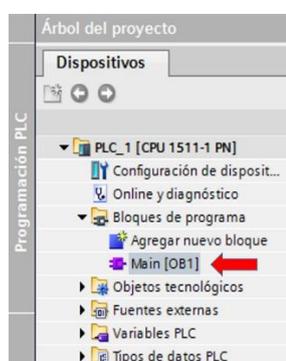


Figura 60: Árbol del proyecto

2.9.1. Descripción de bloque “MAIN [OB1]”

El bloque posee las siguientes partes las cuales permite la creación del programa.

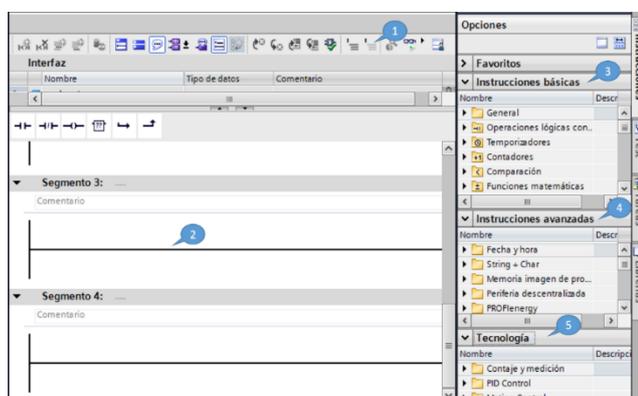


Figura 61: Ventana de programación Main [OB1]

1. Barra de herramientas.
2. Ventana de instrucciones.
3. Paleta de Instrucciones básicas.
4. Paleta de Instrucciones avanzadas.
5. Bloque tecnológico.

2.9.2. Creación de variables del programa

Para realizar el control PID en el PLC es necesario tener todas las variables que se utilizará en el programa. Tener en cuenta la dirección que se asignó a la entrada y salida analógica del PLC. Las variables que se van a usar en el programa, acogen valores diferentes y se dividen de la siguiente manera:

- Variables locales: Solo sirven para el bloque en donde se la creo.
- Variables del PLC: Están disponibles para todo el controlador.

A continuación se describen los pasos necesarios para crear las variables:

1. Abrir la opción “Agregar tabla de variables” en el Árbol del proyecto.

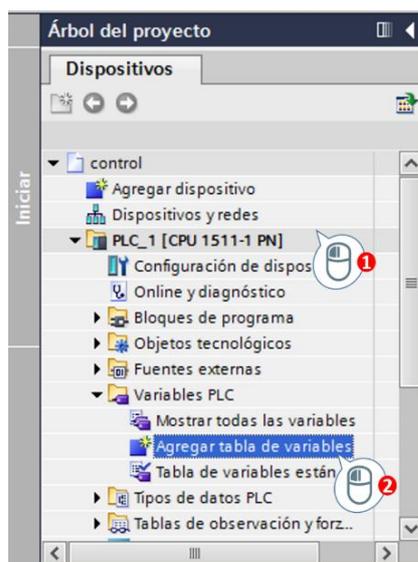


Figura 62: Acceso a la tabla de variables

2. Escribir el nombre de la variable, seleccionar el tipo de dato y la dirección.

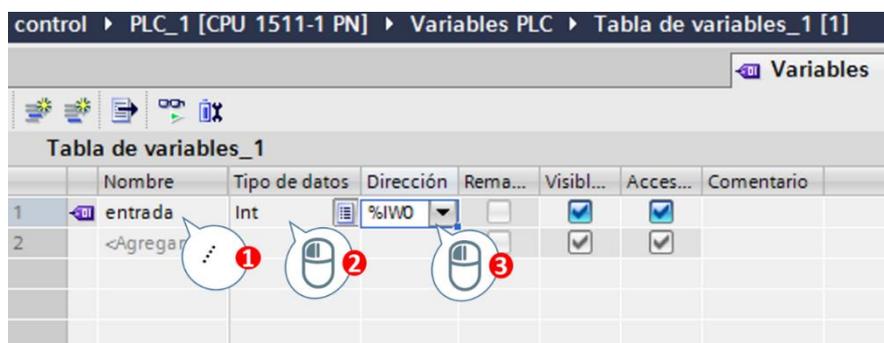


Figura 63: Tabla de variables

En este ejemplo se creó la variable en la cual se tendrá el dato de intensidad de corriente adquirido por el PLC, de igual manera se debe crear todas las variables que se utilizará en todo el programa del PLC. A continuación se procede a escalar la entrada de intensidad para poder apreciar la magnitud medida en unidades de flujo.

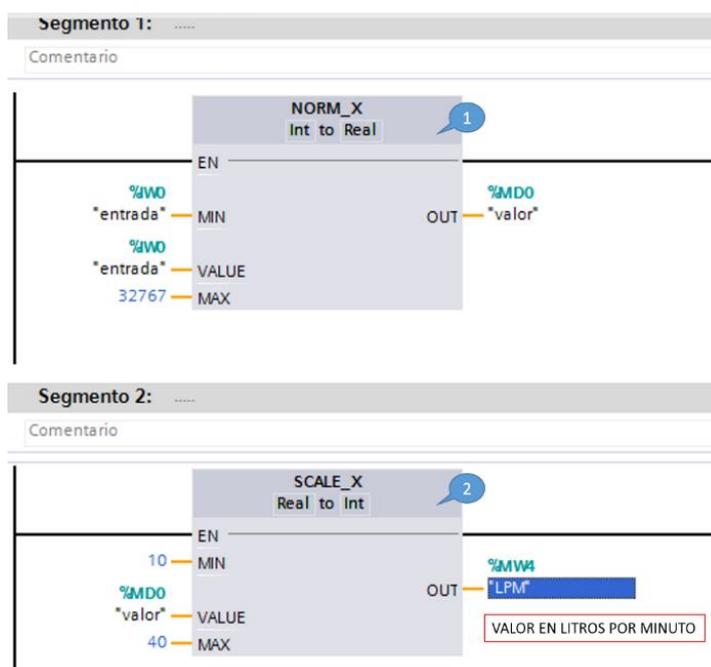


Figura 64: Escalada de la entrada en LPM

3. Bloque “NORM_X”

Normaliza el valor de la variable VALUE representándola en una escala lineal, los parámetros MIN y MAX sirven para definir los límites de un rango de valores se refleja la escala. El resultado de este proceso interno se deposita como número coma flotante en la salida OUT.

4. Bloque “SCALE_X”

Escala el valor de la entrada VALUE mapeándolo en un determinado rango de valores. El número en coma flotante de la entrada VALUE se escala al rango definido por los parámetros MIN y MAX. El resultado de la escala es un número entero que se deposita en la salida OUT.

2.9.3. Creación del objeto tecnológico

El regulador PID está formado por tres partes, la parte proporcional, la integral y la derivativa. Continuamente está tomando datos del valor del proceso y lo compara con un valor deseado. De esta comparación se genera errores, en donde el regulador se encarga de corregirlos, calculando el valor a manipular con una rapidez y mejor estabilidad posible, para establecer que el proceso esté dentro del valor establecido de consigna. Para crear el objeto tecnológico realizar los siguientes pasos:

1. Agregar un objeto tecnológico desde el árbol del proyecto.

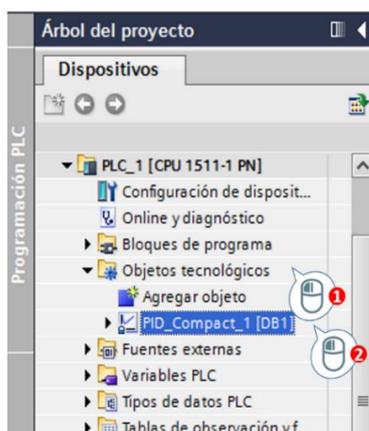


Figura 65: Agregar el objeto tecnológico

2.9.4. Configuración de los parámetros del PID

1. Abrir la ventana de configuración del bloque.

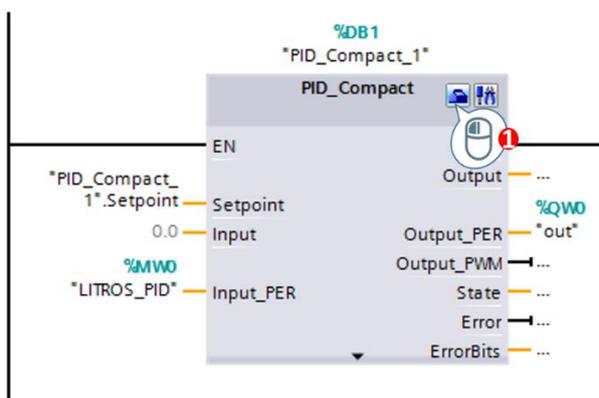


Figura 68: Acceso a la ventana de configuración de bloque PID

2. Seleccionar el tipo de regulación que desea. Para este caso seleccionar, caudal en litros por minuto (l/min).

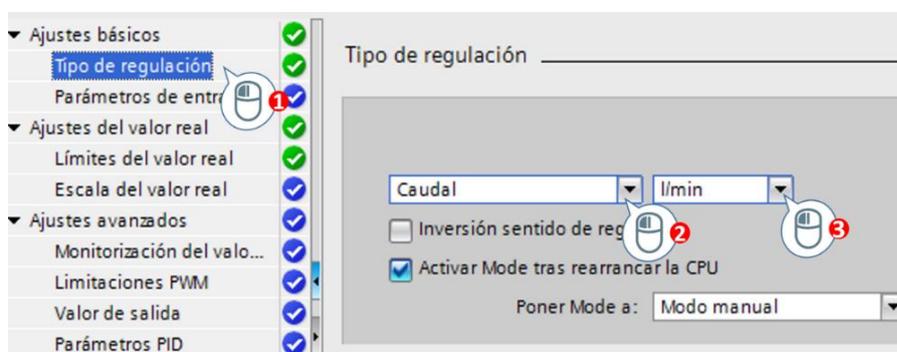


Figura 69: Selección del tipo de regulación

3. En los parámetros de entrada, seleccionar Input_PER (analógica) y para la salida Output_PER (analógica).

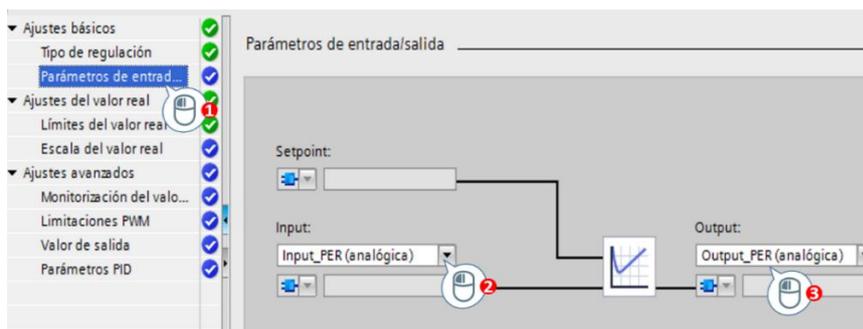


Figura 70: Parámetros de entrada/salida

4. Introducir los límites del valor.

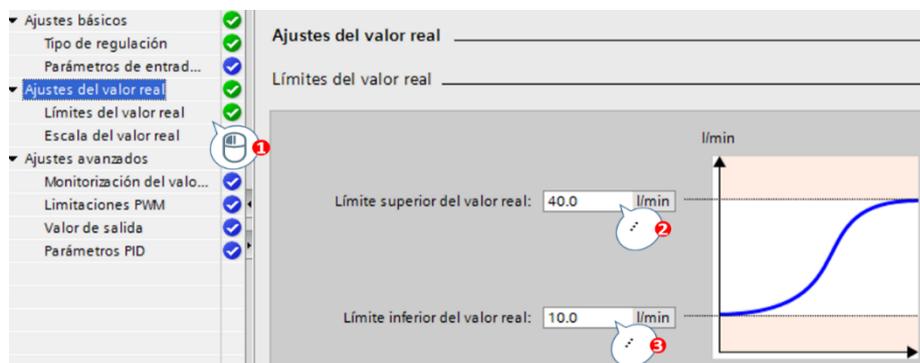


Figura 71: Límites del valor real

5. En escala del valor real colocar el rango de la entrada del proceso.



Figura 72: Escala del valor real de entrada.

6. Configurar la salida Output_PER y colocar los valores en el rango del 0 al 100% para que el PID regule automáticamente.

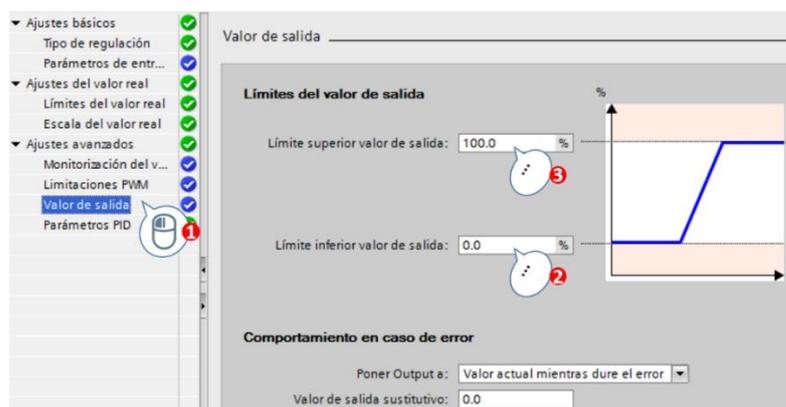


Figura 73: Configuración del Valor de salida

2.9.5. Cargar el programa en la CPU del PLC S7-1500

1. Realizar la compilación del programa, para verificar que no existe errores.

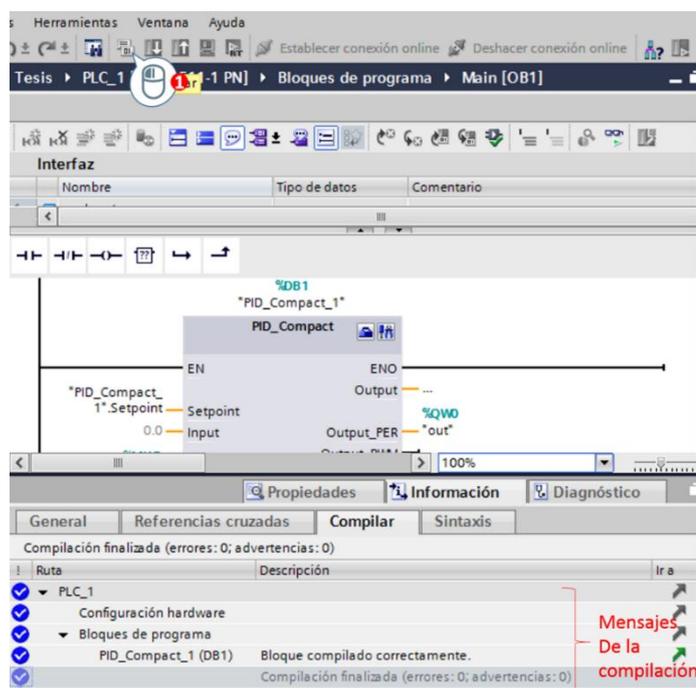


Figura 74: Compilación del programa

2. Cargar en el dispositivo el hardware y software.

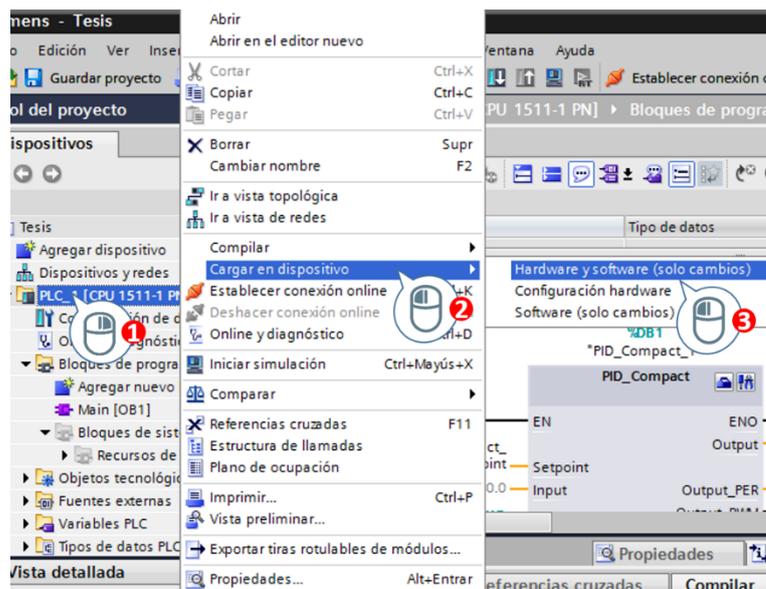


Figura 75: Cargar el programa en el PLC

2.10. Configuración de la TOUCH PANEL

De la misma manera que el PLC S7-1500 la TOUCH PANEL requiere de la herramienta SIMATIC WinCC del TIA PORTAL para la configuración de las aplicaciones que se realizará en el HMI. El WinCC del TIA PORTAL facilita la configuración del proyecto, permite la programación de la interfaz del usuario, esta debe ser intuitiva y con su respectiva documentación. El HMI en la TOUCH PANEL presenta una imagen de todo el proceso, en el cual se tienen diferentes opciones que permiten al operario o al administrador el acceso a ciertas cualidades del proceso. Las opciones que se tiene en el menú principal son las siguientes:

- Revisar avisos del proceso.
- Manejar parámetros del control.
- Visualización del comportamiento del proceso.
- Monitoreo en general del proceso.

A continuación se describen los pasos necesarios para configurar y programar la TOUCH PANEL.

1. Agregar el dispositivo TOUCH PANEL desde el árbol del proyecto.

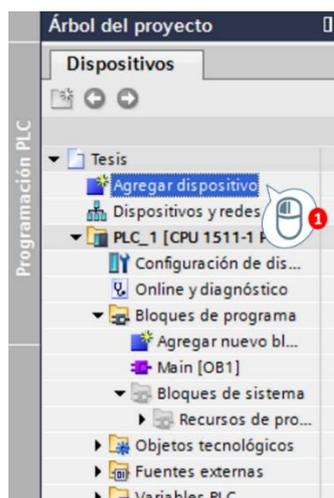


Figura 76: Agregar nuevo dispositivo

2. Seleccionar el dispositivo HMI correcto; para este proyecto se tiene una TOUCH PANEL de 6" KTP-600 Basic color PN.

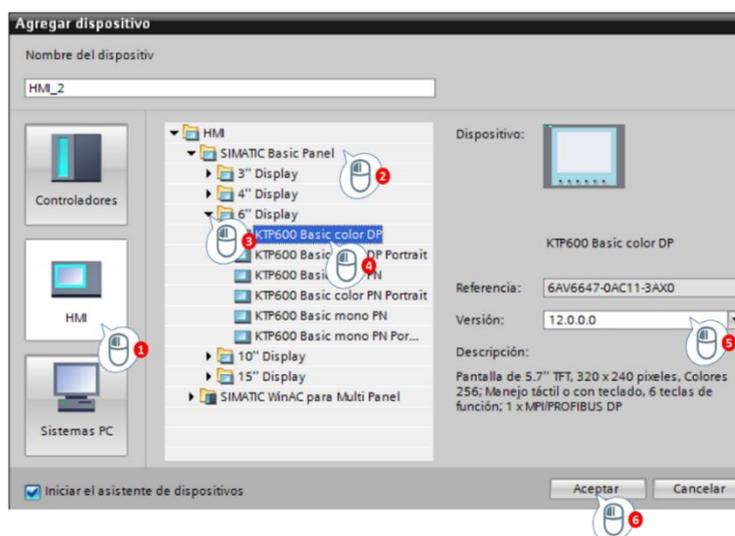


Figura 77: Selección del dispositivo para el HMI

2.11. Conexión con el PLC.

La CPU del PLC S7-1500 permite conectarse directamente a la TOUCH PANEL, puesto que posee dos puertos de comunicación Ethernet. El primer puerto se conecta directamente al PLC con la pantalla táctil, mientras que el

restante sirve para cargar los programas tanto en la CPU como en la TOUCH.
A continuación se detallan los pasos para la conexión con el PLC:

1. Seleccionar el tipo de CPU con el cual se comunicará al HMI.

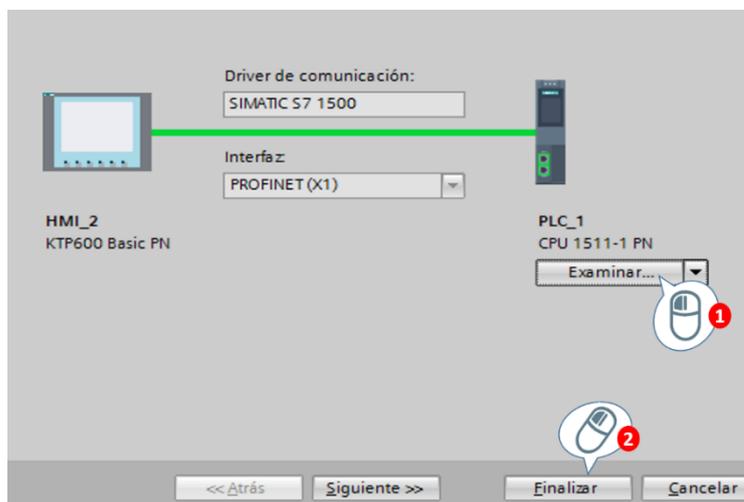


Figura 78: Selección de la CPU para la conexión con el HMI

2. Si se desean iconos preestablecidos presentes en el software se debe seguir configurando según los requerimientos, en caso contrario seleccionar la opción finalizar.

2.12. Crear objetos de entrada y salida de una variable

Después de crear una imagen de inicio, se procede a elaborar la interfaz con botones de acceso, bloques de datos, menús, etc., mediante los siguientes pasos:

1. Agregar un campo para la entrada o salida de datos.

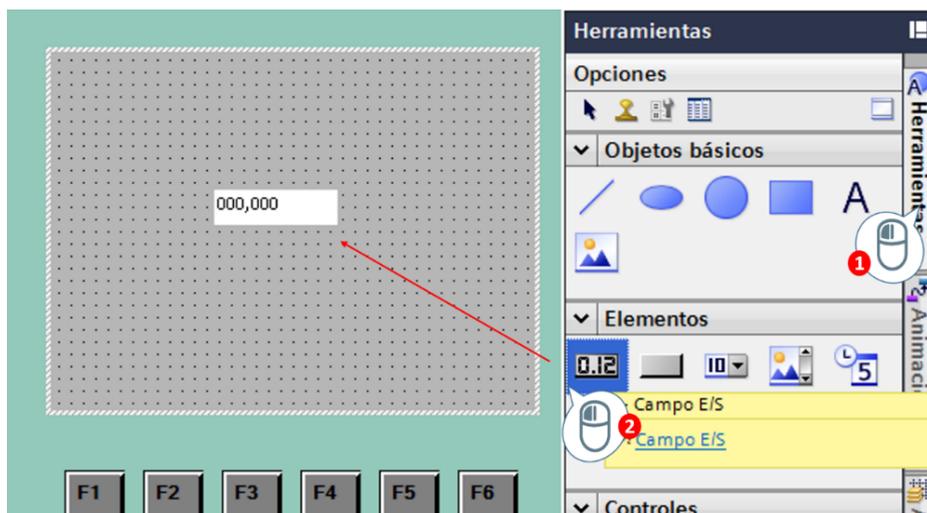


Figura 79: Anadir un campo de entrada/salida de un dato

2. Para configurar este elemento es necesario dirigirse a propiedades, general, el cual permite editar al elemento, para que sea solo de entrada, salida, o las dos. Además se asigna la variable del PLC con la que va a interactuar este campo. En este caso se realiza la configuración de entrada del Set Point.

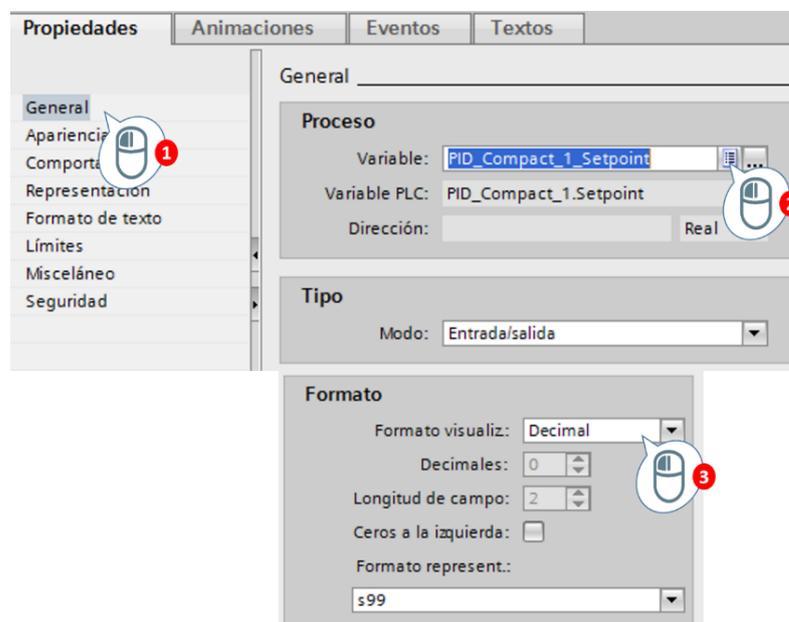


Figura 80: Asignación del bloque a una variable del PLC

3. Crear un botón para acceder a las imágenes en las cuales se mostrará más propiedades del HMI.

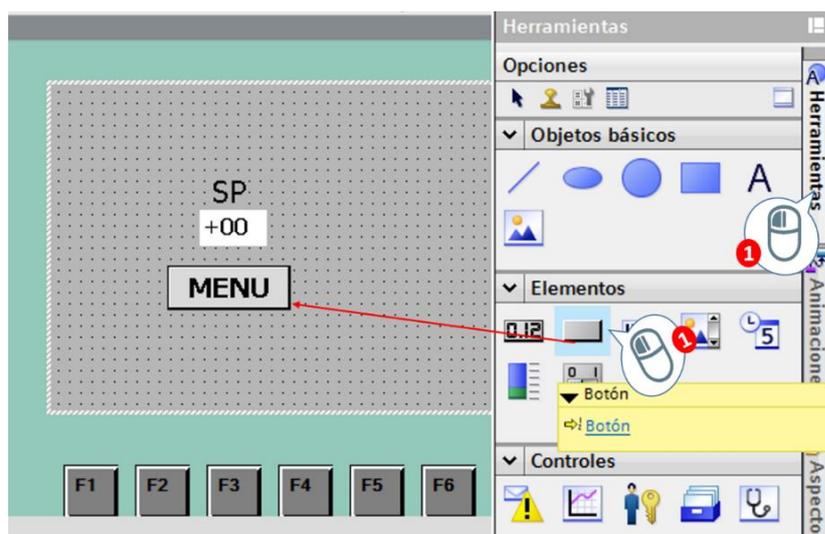


Figura 81: Agregar un botón

4. Configurar la acción que se va a ejecutar cuando el botón sea activado.

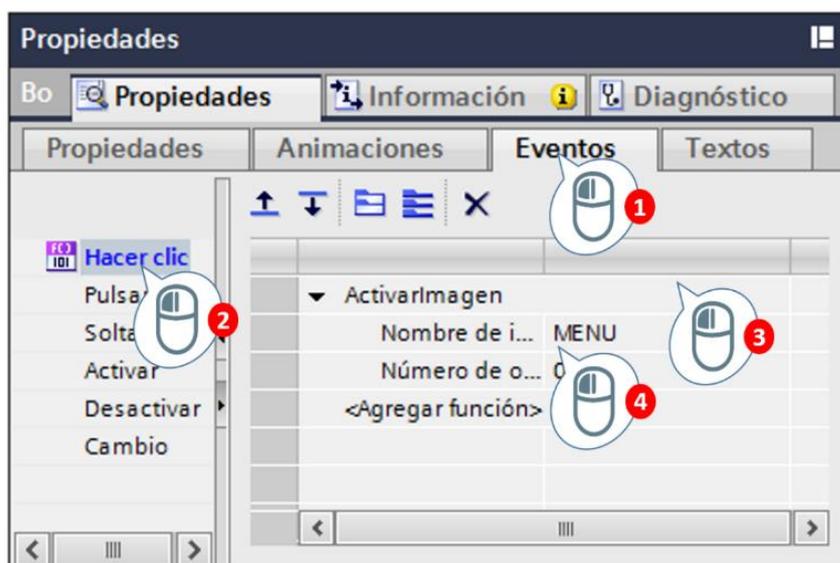


Figura 82: Configuración de las propiedades del botón

2.13. Programación de los controladores en LABVIEW.

2.13.1. Función de transferencia de la estación de caudal

En este apartado se utiliza el software MATLAB el cual permite mediante el comando "ident" obtener la función de transferencia de la estación de caudal.

1. Con apoyo del software LabVIEW se obtiene los datos tanto de entrada (Transmisor) y salida (Variable de Proceso) de la estación mediante la tarjeta de adquisición NI MYDAQ, para ello es necesario que estas señales estén a una misma escala, para este caso tanto la entrada como salida están en un rango de 1 a 5 V.

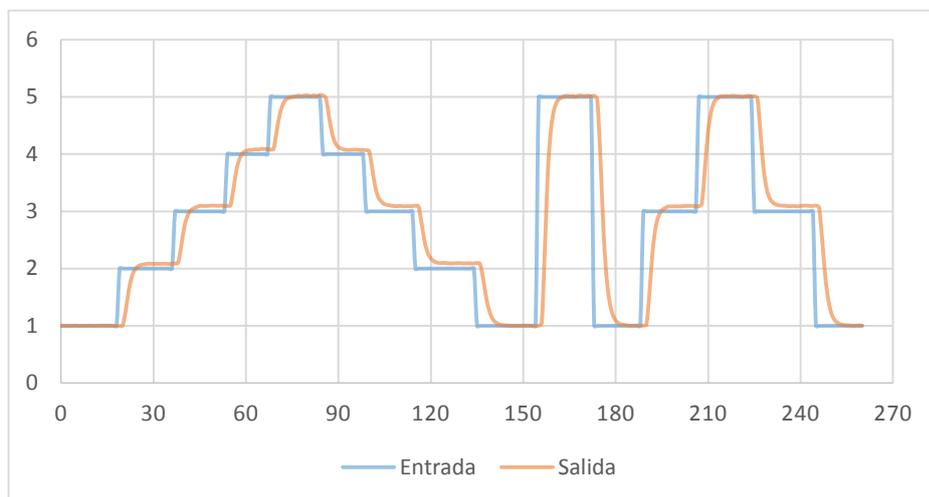


Figura 83: Respuesta de la salida frente al cambio de entrada

2. Con la obtención de los datos se procede a ingresar cada valor en el software MATLAB, para esto se crea una nueva variable dando clic en el icono “New Variable”.

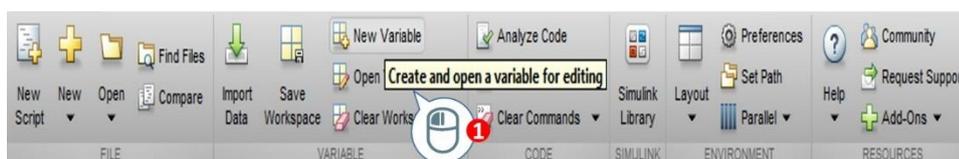


Figura 84: Creación de una nueva variable en MATLAB

3. Se despliega una nueva ventana con cuadrículas para el ingreso de los valores de entrada y salida obtenidos en pasos anteriores, para comodidad del usuario se renombra a las variables.

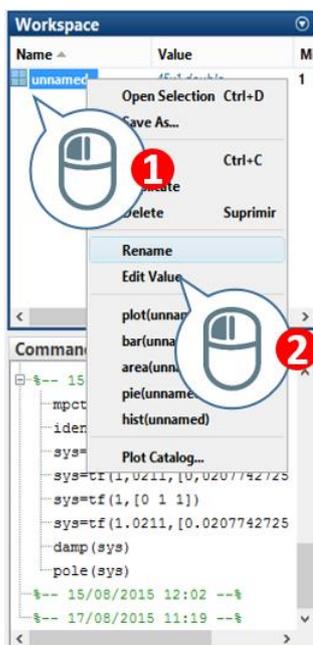


Figura 85: Asignar valores a la variable ENTRADA

- Después de haber ingresado los valores en el software, se procede a ejecutar función “ident” en la ventana de “Command Window” de MATLAB.

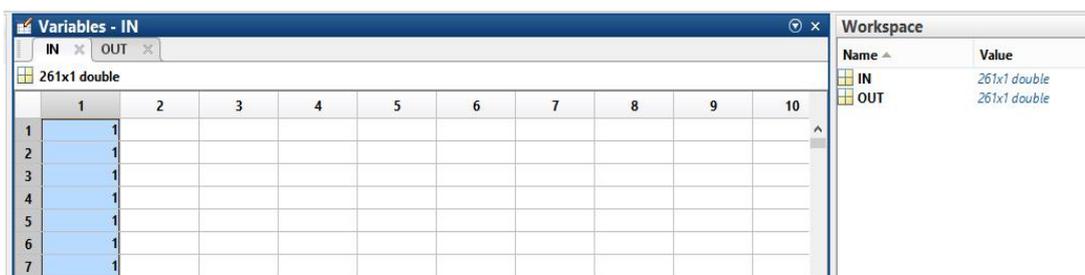


Figura 86: Asignar valores a la variable SALIDA

- Tras ejecutar la función “ident” se levanta automáticamente una ventana, en la cual es necesario cargar los datos previamente guardados en las variables del software dando clic en “Time domain data”, se desplegará una nueva ventana, donde es necesario llenar los siguientes casilleros, para luego presionar el botón “Import”:

- Input: Variable de ENTRADA (IN)

- Output: Variable de SALIDA (OUT)
- Data name: Nombre de la función a generar (FUNCIÓN)
- Starting time: Tiempo donde se inició la toma de muestra (1)
- Sampling interval: Tiempo en que se adquirió cada valor de entrada y salida (0.001)

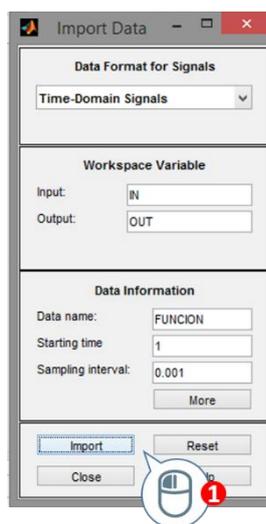


Figura 87: Importación de datos a la función ident de MATLAB

6. Al importar los datos de entrada y salida ya es posible el cálculo de la función de transferencia para este caso se obtienen 2 formas, la primera en el dominio s y la segunda en matriz de estados.

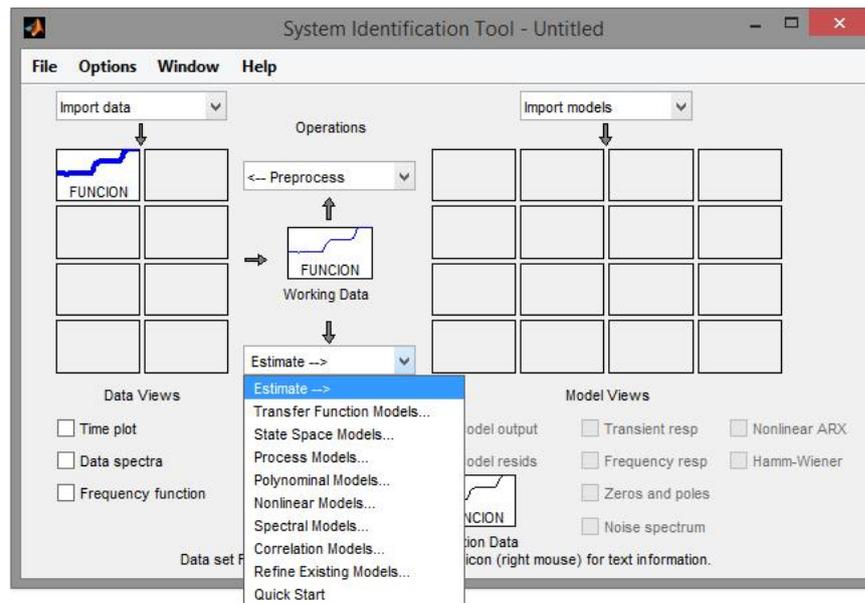
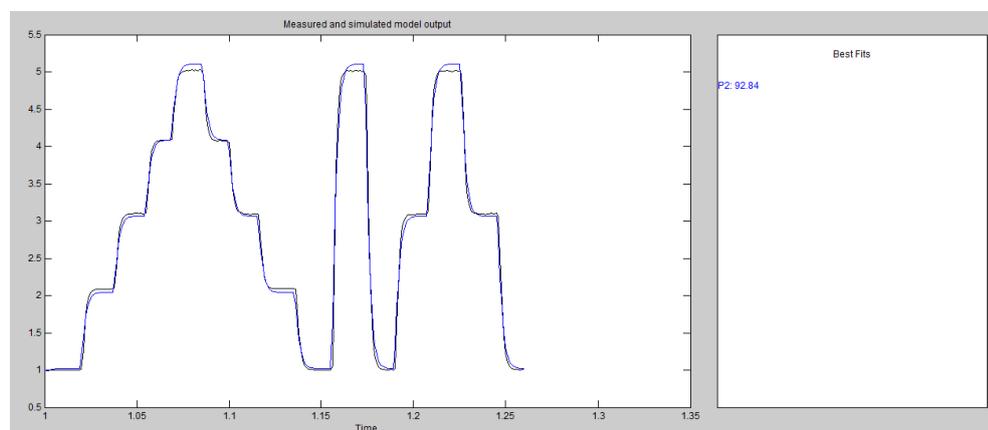


Figura 88: Cálculo de la función de transferencia en el matriz de estados

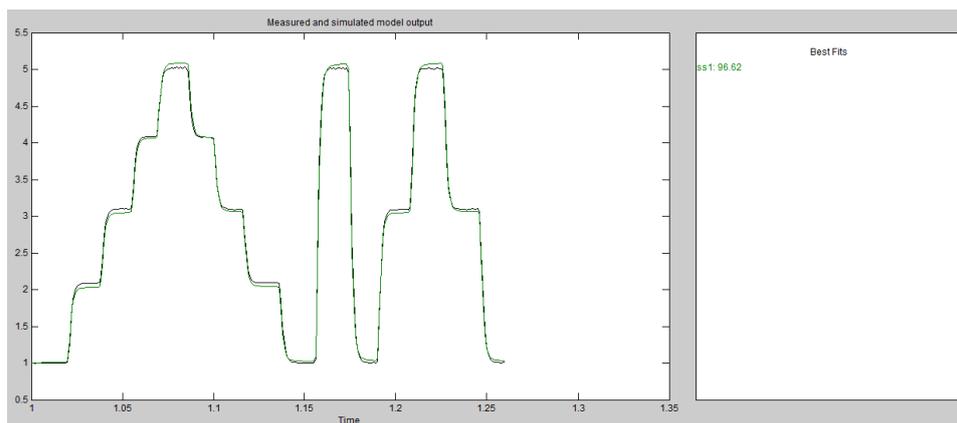
7. Se obtienen los siguientes resultados en porcentaje de similitud de los datos obtenidos con la función de transferencia.



Figura 89: Porcentajes de similitud de la función de transferencia



(a)



(b)

Figura 90: Gráficas de las FT: a) Dominio s, b) Matriz de estados

8. La función de transferencia de la estación de caudal se describe de las siguientes maneras **Ecuación 2.1**, **Ecuación 2.2** Y **Ecuación 2.3** :

$$G(s) = \frac{Kp}{(1+Tp1*s)(1+Tp2*2)} \quad (2.1)$$

- $Kp = 1.0212$
- $Tp1 = 0.0014415$
- $Tp2 = 0.0014413$

$$x(t + Ts) = Ax(t) + B u(t) + K e(t) \quad (2.2)$$

$$y(t) = Cx(t) + D u(t) + e(t) \quad (2.3)$$

Reemplazando los valores de las matrices se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.80 & -0.23 & 0.007 & 0.008 \\ 0.59 & 0.22 & 0.20 & -0.01 \\ -0.02 & -0.68 & -0.28 & -0.38 \\ 0.006 & -0.019 & -0.15 & 0.87 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.007 \\ 0.12 \\ 0.11 \\ 0.008 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.01 \\ 0.04 \\ 0.12 \\ -0.57 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ e_3(t) \\ e_4(t) \end{bmatrix}$$

$$[y_1(t)] = [-12.16 \quad 0.9008 \quad 0.022861 \quad -0.07599][x_1(t)] + [0][u_1(t)] + [e_1(t)]$$

2.13.2. Adquisición de datos con la NI- MYDAQ

Para realizar los controles es necesario la obtención del valor que envía el transmisor Rosemount, para esto se utiliza los bloques presentes en el software LabVIEW.

1. Crear un nuevo proyecto en LabVIEW en la ventana inicial del software.

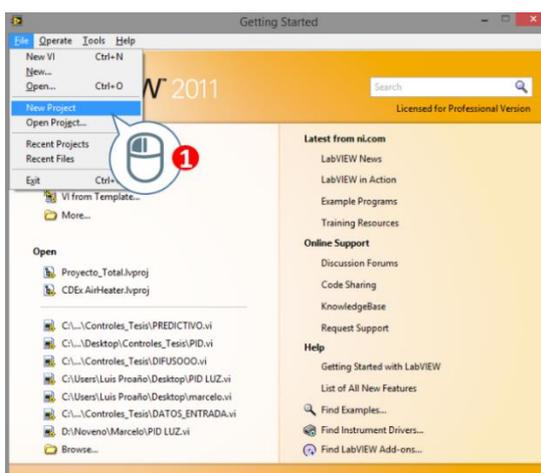


Figura 91: Crear un nuevo proyecto LabVIEW

2. En la ventana que se despliega seleccionar “My Computer” y se crea un nuevo VI, donde aparecerá la pantalla para la programación en bloques y el panel frontal del nuevo VI.



Figura 92: Creación de un nuevo VI dentro del Proyecto

3. En el programa se obtendrá el valor del transmisor mediante el puerto DMM de la NI MYDAQ y será guardado en una variable compartida “ENTRADA” para llevar acabo esto, se abre nuevamente el explorador del proyecto “My Computer” y se presiona clic en “New”, “Variable”.

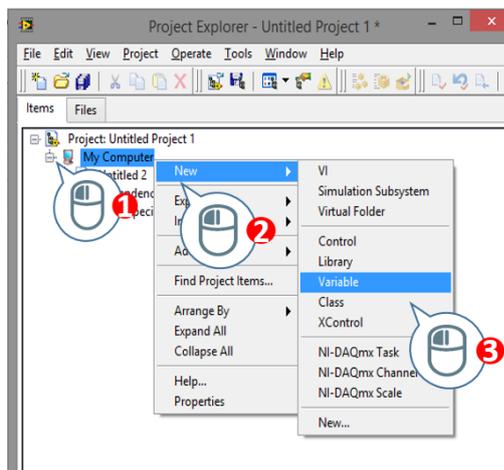


Figura 93: Creación de la variable compartida “ENTRADA”

4. Se despliega la configuración de la variable, para este caso será de tipo Doble, Single Process y se designa un nombre.

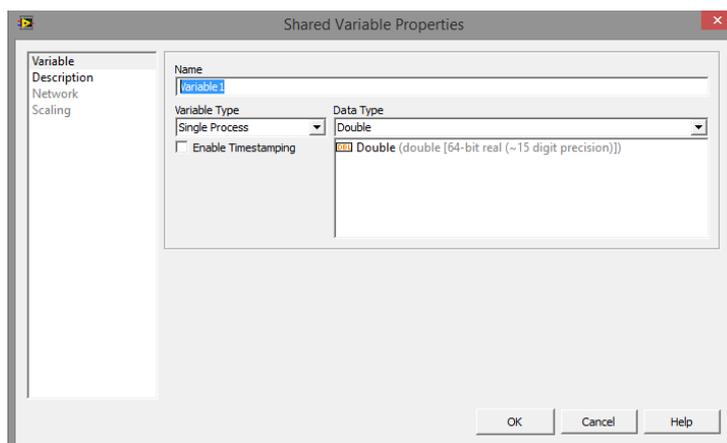


Figura 94: Configuración de la variable compartida “ENTRADA”

5. Se programa el VI que permita obtener datos de nuestra tarjeta mediante los bloques DAQmx y que se guarde en nuestra variable

compartida “ENTRADA” ya que estará presente en los otros VIs del proyecto como la Variable del Proceso.

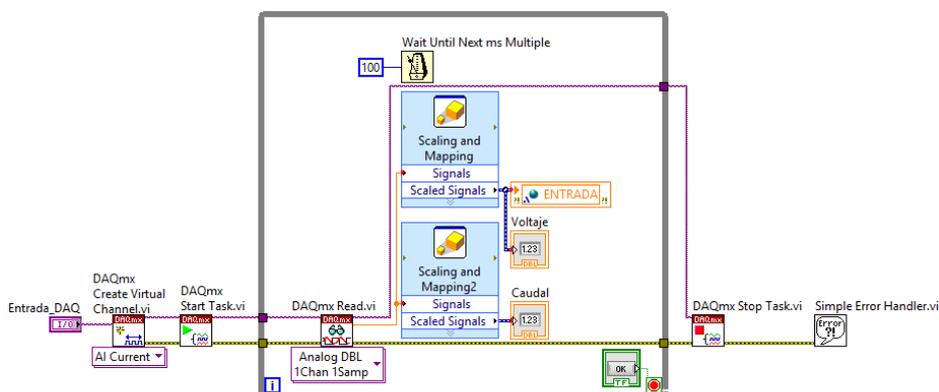


Figura 95: Programa de adquisición de corriente con la NI MYDAQ

2.13.3. Control PID en LABVIEW

Se implementa el control PID, el cual consta de dos variables de ingreso al bloque de LabVIEW “SP” y el “PV” y una salida “CV”, las variables de ingreso al controlador son dadas la primera por el usuario y la otra es generada por el transmisor Rosemount mientras que la salida de la NI MYDAQ entrega voltaje al variador de frecuencia dependiendo el Set Point que se requiera.

a. Creación del control PID en LABVIEW

1. Se crea un nuevo VI dentro del explorador del proyecto, ahí se despliega la venta de bloques y el panel frontal, para la creación del controlador es necesario la introducción de la variable compartida “ENTRADA”, la cual se procede arrastrar desde el explorador del proyecto hasta la venta de diagrama de bloques.

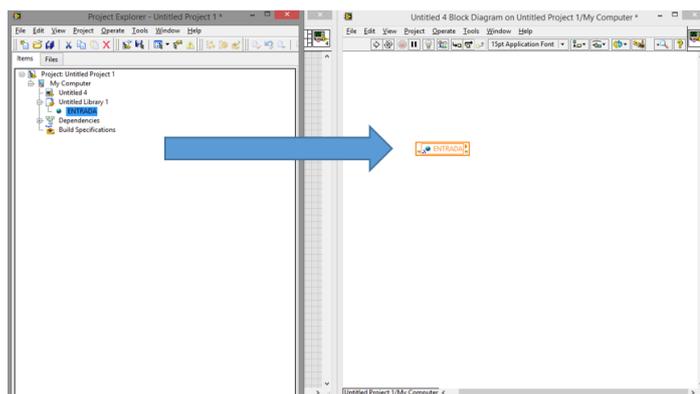


Figura 96: Variable compartida para el programa del PID

2. El control PID es implementado con el toolkit “Control Design & Simulation”.

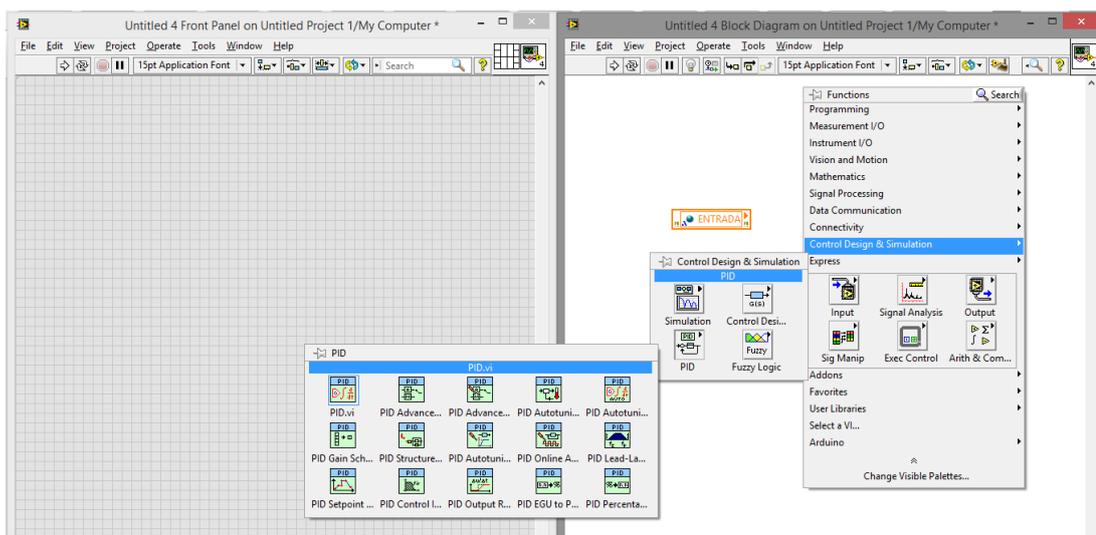


Figura 97: Icono PID

2.13.4. Control difuso en LABVIEW

Se implementa un controlador difuso, el cual consta de una variable de entrada “ERROR” con un rango de (4 a 20 mA) y una salida (0 a 10 V) “VARIABLE DE CONTROL”. (Figura 98).

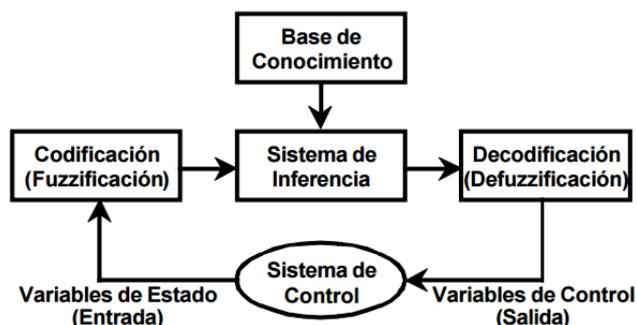


Figura 98: Estructura general de un sistema de lógica difusa

El “ERROR” se obtiene de la resta del SP (Ingresado por el usuario) con la “VARIABLE DEL PROCESO” (Entregada por el Transmisor), este cálculo se lo realiza en la programación. Para la salida del controlador difuso se usa una variable con un rango de 0 a 10 V, adicional a esto el controlador difuso consta de 7 reglas obtenidas a partir de su entrada y de su comportamiento.

a. Creación del controlador difuso en LABVIEW

1. Iniciar el software “LabVIEW” y crear un nuevo VI dentro del explorador del proyecto.

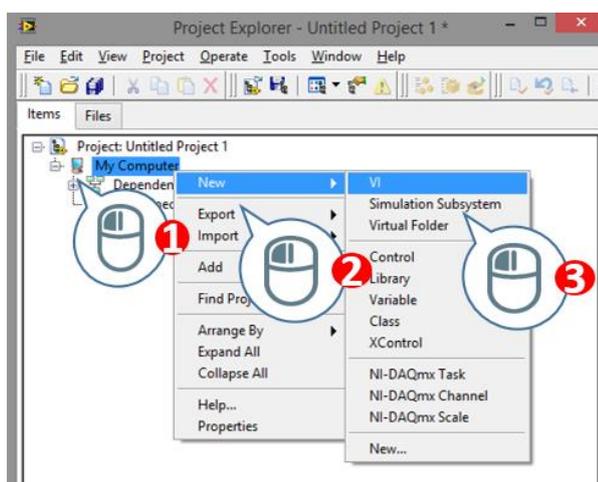


Figura 99: Creación de un nuevo VI

2. Hacer clic en la opción “Fuzzy System Designer” que se encuentra dentro la opción “Tools”, para abrir el asistente del controlador.

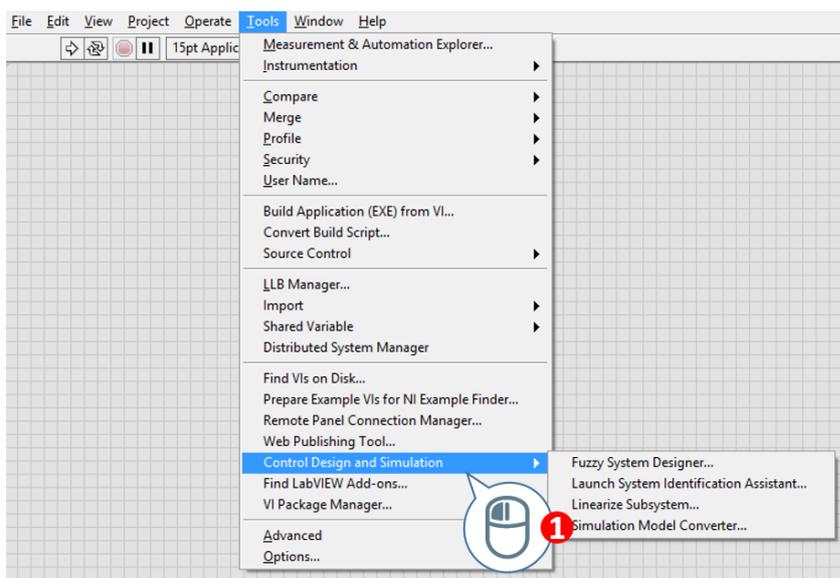


Figura 100: Selección del asistente del Control Difuso

3. En el asistente del controlador Difuso, permite ingresar las entradas y salidas de la estrategia de control.

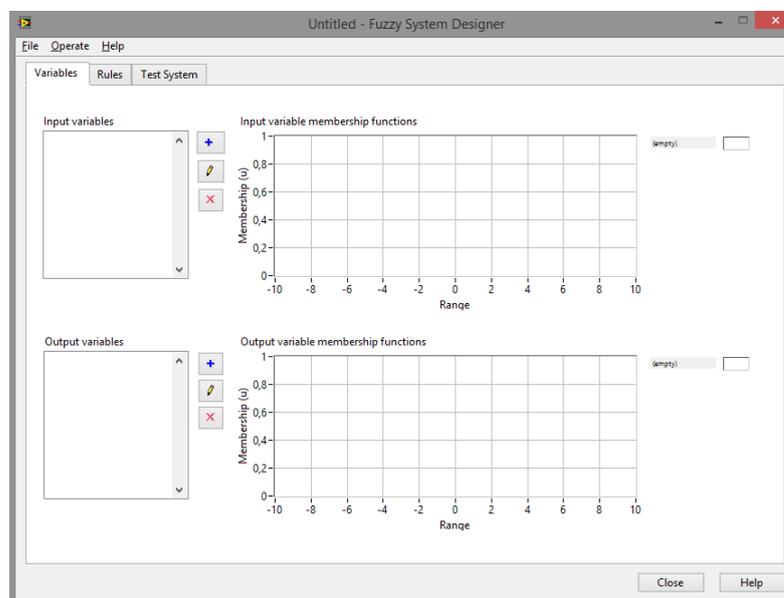


Figura 101: Ventana del asistente del Control Difuso

4. Seleccionar el icono + para añadir entradas y salidas al control, en este caso se utiliza una entrada “Error” y una salida que se le denomina “SALIDA”.

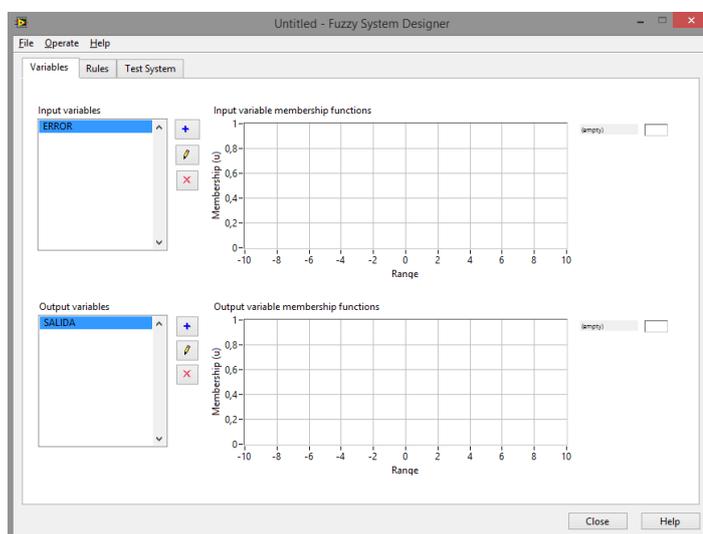


Figura 102: Selección de la entrada y salida de la estrategia de control

5. Se escribe el rango de la entrada “ERROR” -100 a 100, luego de esto con el icono + se asigna una nueva función de membresía donde es necesario completar los siguiente datos “Name”, la forma que va a tener “Shape” (trapezoidal, triangular, Gaussiana, etc.), el rango que va ocupar “Points” y por último el color “Color”.

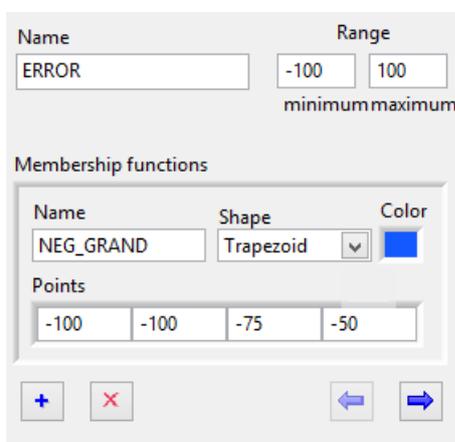


Figura 103: Creación de los conjuntos difusos

6. Para la entrada se trabaja con 7 funciones de membresías, siendo 2 de forma trapezoidal y las restantes de forma triangular, distribuidas en todo el rango (-100 a 100), se optó por una división uniforme de las funciones por ser una planta que tiende a ser lineal, para finalizar se da clic en OK

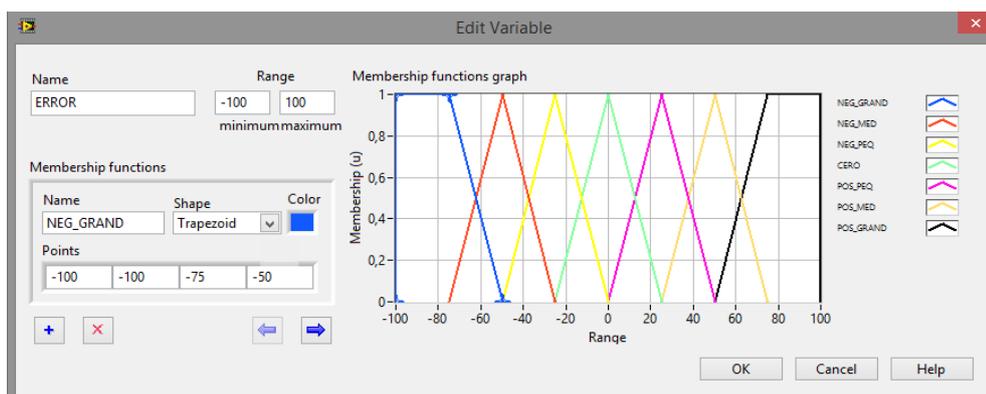


Figura 104: Funciones membresía para la entrada del controlador

7. Con la variable “SALIDA” se procede de la misma forma que la entrada, para el rango de la variable es de -3 a 3 con 7 funciones de membresía de forma triangular.

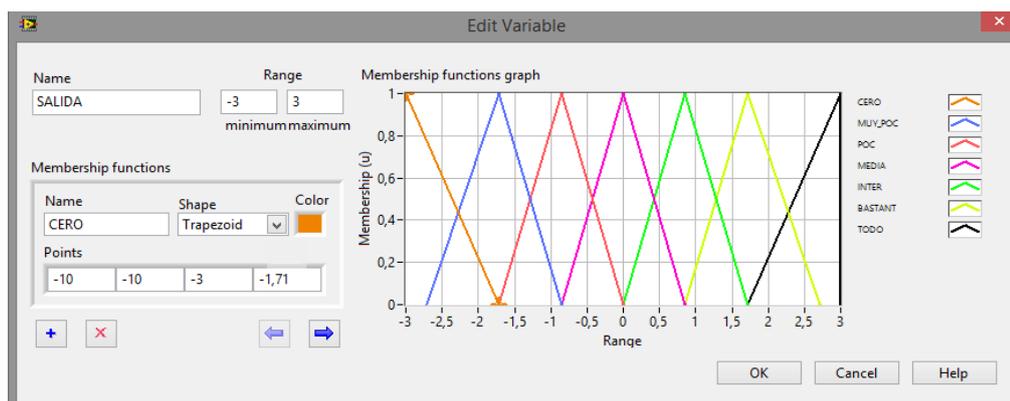


Figura 105: Funciones de membresía de la variable salida

8. Finalmente se ingresa la base de reglas de la (Tabla 23) en la opción “Rules” que se encuentra en el asistente del controlador, el método de defuzzificación se seleccionó por centro de Área.

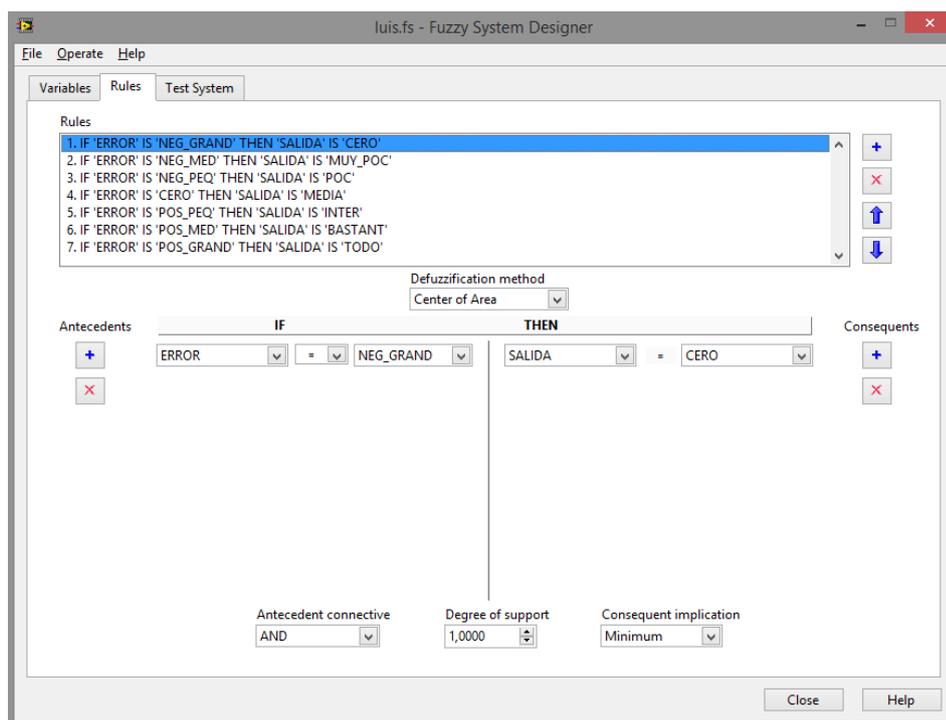


Figura 106: Reglas para el control Difuso

Tabla 23

Reglas difusas del controlador

SALIDA	CERO	MUY_P	POC	MEDIA	INTER	BAST	TODO
ERROR							
NEG_G	X						
NEG_M		X					
NEG_P			X				
CERO				X			
POS_P					X		
POS_M						X	
POS_G							X

- Una vez creado las funciones de membresía y las reglas es necesario la creación del programa para el control difuso mediante el icono “FL FUZZY CONTROLLER”.

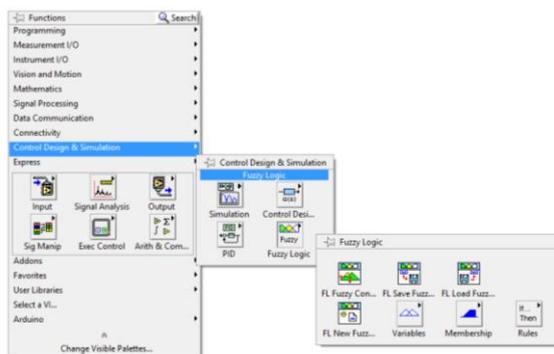


Figura 107: Bloque del control Difuso en LabVIEW

2.13.5. Control predictivo MPC en LABVIEW

Para la implementación del controlador es necesario obtener la función de transferencia en matriz de estados, para ello se usa el software MATLAB con la función “ident” (**Figura 108**).

a. Creación del controlador MPC en LABVIEW

1. crear un nuevo VI dentro del explorador de proyectos en LabVIEW, para luego mediante los bloques de “Predictive Control” implementar el algoritmo de la estrategia de control.

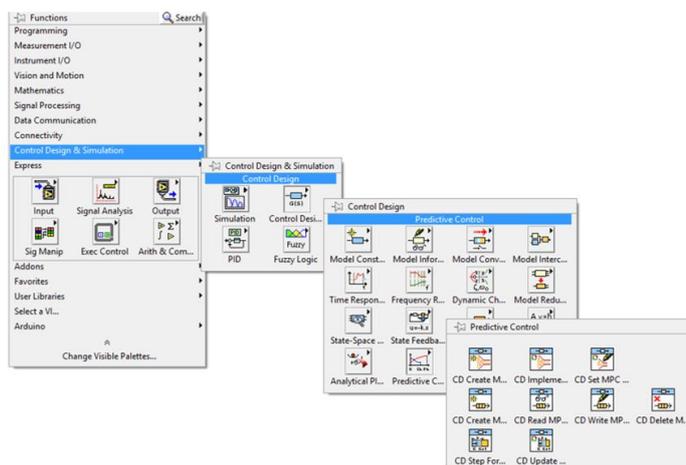


Figura 108: Herramientas del control MPC en LabVIEW

2. Para la implementación del control MPC se utiliza la herramienta CD CREATE MPC CONTROLLER, ya que esta herramienta crea un modelo de controlador al poseer la función de transferencia en variables de estado, este instrumento virtual tiene tres elementos principales, y un elemento de salida que corresponde al modelo del control predictivo.

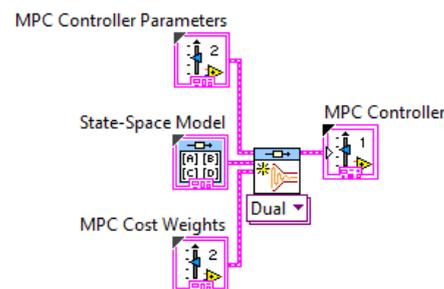


Figura 109: CD CREATE MPC CONTROLLER

3. EI MPC PARÁMETROS DEL CONTROL. En este elemento contiene la siguiente información:
- Horizonte de Predicción: indica el número de muestras futuras.
 - Horizonte de Control: este valor es usado en la función de costo para el cálculo de la acción de control.
 - Ventana inicial: en esta parte se ingresa los rangos iniciales del control en donde la función de costo no considera, es utilizado para los sistemas de control que presentan retrasos en sus modelos
 - Acción Integral: para sistemas que no poseen este tipo de acción en el modelo de la planta
4. Modelo de espacio de estados: en este elemento se ingresa el modelo matemático de la estación, hay que tener en cuenta que la precisión en la modelación de la planta mejora el rendimiento de la estrategia de control.

5. MPC pesos de ponderación: estos valores corresponden a las matrices Q, R, N de la función de costo:
 - Peso error de la salida correspondiente a la matriz Q: que representa la ponderación de los errores en cada salida de la planta este valor debe ser positiva definida.
 - Peso de la tasa de cambio en la acción de control: especifica el peso de la matriz R en función de costo, la dimensión de esta matriz debe ser igual al número de entradas de la planta y positiva.
 - Peso de la acción de control: especifica el peso de la matriz N, se usa para modelos que tengan más entradas que salidas.

6. El CD IMPLEMENT MPC CONTROLLER es necesario para la programación e implementación del control predictivo.

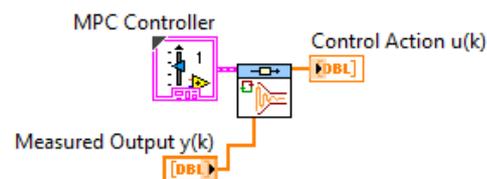


Figura 110: CD IMPLEMENT MPC CONTROLLER

- El MPC Controller: es un Sub vi que especifica el modelo del control MPC, que va a ser utilizado por el modelo de la planta.
 - Medición de la salida $y(k)$: en este elemento se especifica el valor de la salida de la planta al instante k y el valor de realimentación.
7. La respuesta del CD IMPLEMENT MPC CONTROLLER entrega la acción de control a implementarse en la matriz de espacio de estados.

 8. El CD SET MPC CONTROLLER, esta herramienta permite actualizar los parámetros del controlador MPC en tiempo real.

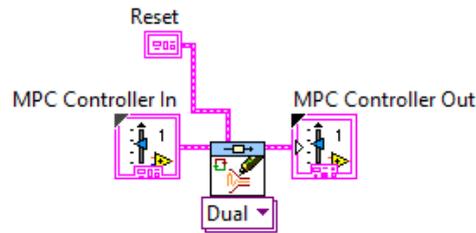


Figura 111: CD SET MPC CONTROLLER

9. MPC Parámetros, actualiza el horizonte de control y el horizonte de predicción, los pesos de ponderación, las restricciones para la optimización y el estimador de estados del controlador.
10. El CD UPDATE MPC WINDOWS, es el encargado de dimensionar apropiadamente la señal de referencia desde una señal en el instante k al instante $k + \text{horizonte de predicción}$.
- Set Point: es la señal de referencia al instante $k + \text{horizonte de predicción}$.
 - Inicializar: especifica si es necesario restablecer el cálculo de la señal del Set Point.

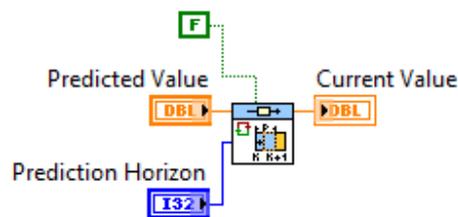


Figura 112: CD UPDATE MPC WINDOWS

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.1. Introducción

En el presente capítulo se puntualizan a la estación en su totalidad (**Figura 113**) y a realizar las pruebas necesarias, la comparación entre las estrategias de control realizando cambios a diferentes valores de consigna, además se detallan los alcances y limitaciones del proyecto.



Figura 113: Estación de Caudal

3.2. Conexiones previas de la estación de caudal

Para el funcionamiento del módulo se debe realizar la correcta conexión de los dispositivos y equipos tal como se muestra a continuación (**Figura 114**).

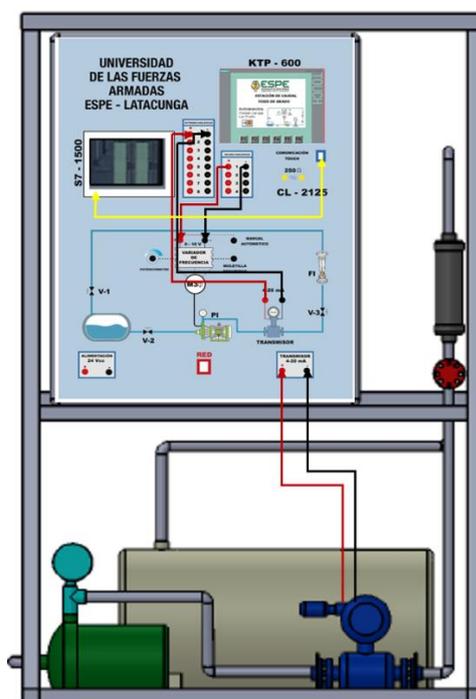


Figura 114: Conexiones previas

1. Establecer la conexión entre la TOUCH PANEL y el PLC, por el puerto PROFINET.
2. Energizar el transmisor con la fuente de alimentación AC que está ubicada en el lado derecho de la estación.
3. Conectar la salida del transmisor de 4-20mA del canal 0 del módulo de entradas analógicas.
4. Conectar la salida del módulo del canal 0 al variador de frecuencia.
5. Guiarse por las etiquetas y los colores de cable para conectar debidamente los dispositivos.

3.3. Pruebas experimentales

Ya ensamblado el módulo se realiza las pruebas respectivas para analizar y comprobar el comportamiento del módulo de caudal.

3.3.1. Prueba del transmisor

Para realizar las pruebas al transmisor Rosemount 8732E se compara el valor que se visualiza en el display del transmisor con la posición del flotador del rotámetro, haciendo variar el caudal de forma manual para calcular el error relativo porcentual en cada medición, y el error promedio total, dicha prueba sirve para verificar que el transmisor esté funcionando.

3.3.2. Transmisor magnético de flujo 8732E

El transmisor se lo ajusta a la escala disponible en el indicador de rotámetro, en un rango de 10 a 40 litros por minuto (LPM). Los datos obtenidos de la prueba se presentan en la (Tabla 24) con sus respectivos errores.

Tabla 24

Pruebas del transmisor de flujo 8732E

TRANSMISOR [LPM]	ROTÁMETRO [LPM]	ERROR [%]
10,12	10	0,12
13,03	13	0,23
22,04	22	0,18
33,09	33	0,27
40,02	40	0,05
33,07	33	0,21
22,02	22	0,09
13,05	13	0,38
10,09	10	0,9
ERROR PROMEDIO		0,27

3.4. Módulo de salidas analógicas AQ 4XU/I ST

Para realizar la prueba del módulo ya una vez configurado, se genera valores dentro del rango de bits que permite, así se verifica si la salida está acorde a los requerimientos del proceso. El rango de la salida analógica esta de 0-32760, este valor teóricamente representa de 0 a 10 Vcc.

3.5. Módulo de entradas analógicas AI 8XU//RTD/TC ST

La prueba que se realizó para este módulo, es comprobar si el valor medido de la corriente presenta debidamente el dato que entrega el módulo, para esto se realiza una comparación del valor de entrada con el el rotámetro y más que todo con el valor que indica el transmisor magnético de flujo. El dato que entrega este módulo teóricamente y por característica del mismo está en el rango de 0-32760, se coloca manualmente el caudal en 10 LPM y 40 LPM, observando este valor en el transmisor y se obtiene realmente los valores para ser escalados en ese rango.

3.6. Variador de frecuencia Delta

La prueba realizada en el variador de frecuencia una vez programado con los requerimientos necesarios del sistema, se utiliza la pantalla de programación de dicho variador, la cual posee un potenciómetro analógico con el que se puede variar la frecuencia y así simular el control de caudal que circula por la tubería. La variación del caudal es de acuerdo a la variación del potenciómetro, se efectuó los experimentos necesarios para ver el tiempo máximo de reacción del variador y según eso seguir programando dicho tiempo para tener una reacción instantánea de caudal.

3.7. Descripción de los privilegios por usuarios

Como todo proceso tiene su respectiva accesibilidad para utilizar todas las funciones del HMI. Los privilegios que se ha creado en la interfaz son:

- Administrador: nombre de usuario "ADMINISTRADOR", la clave asignada es "admin". El administrador tiene todo privilegio sobre el HMI, puede editar el tipo de control como también sus constantes de sintonía, realizar cambios de la variable de consigna en las ventanas que este se encuentre y seleccionar el tipo de control que se realice en el proceso.
- Operario: nombre de usuario es "OPERADOR" la clave que pertenece a este tipo de usuario es "proceso". El operario no tiene todos los

privilegios como el administrador, solamente puede realizar monitoreo de las variables y ver mensajes del proceso, el operario no puede acceder a elegir el tipo de control del proceso, ni cambiar el valor de Set Point.

Principalmente se debe acceder al usuario “ADMINISTRADOR” ya que tiene todos los privilegios del sistema, el proceso está conformado por tres tipos de controles los cuales son: Proporcional (P), Proporcional Integral (PI) y Proporcional Integral Derivativo (PID).

3.7.1. Pasos para ingresar a los diferentes tipos de usuarios

1. Escribir el nombre de usuario y su debida contraseña.



Figura 115: Ingreso al usuario “ADMINISTRADOR”

2. Se abre la ventana del MENU del HMI en el cual se puede observar las diferentes opciones a las que se puede acceder.



Figura 116: Menú del Proceso

CONTROL: en esta opción se tiene los diferentes tipos de control programado, P, PI, PID y además las constantes para sintonizar.

- **PROCESO:** esta opción contiene la conexión del proceso y se muestra el estado de la variable del proceso, su consigna y el porcentaje de la variable de control.
- **TENDENCIAS:** abarca las curvas del proceso, Set Point (SP), process value (PV) y control value (CV).
- **HISTÓRICOS:** contiene los errores del sistema y mensajes de aviso al operador.

3.8. Acceso y descripción de los controles PLC S7-1500

a. Control proporcional

Para seleccionar este control se realiza los siguientes pasos:

1. Seleccionar la opción "CONTROL" en el MENU del HMI.
2. Escoger el control Proporcional "P".
3. Introducir el valor de la constante.

Funcionamiento

La salida del control proporcional depende directamente del error. La mayor desventaja de este control es que mientras más alta sea su ganancia (K_p) la variable del proceso comienza a oscilar, por lo cual esto afecta demasiado al actuador. Este tipo de control no tiene estabilidad y no corrige el error en estado estable.

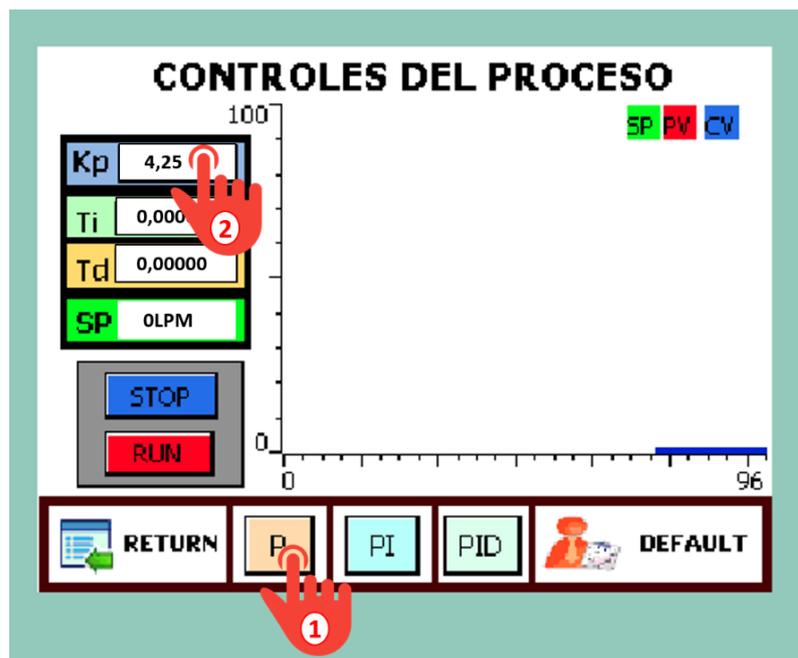


Figura 117: Selección del control (P)

b. Control proporcional integral

Para seleccionar este control se realiza los siguientes pasos:

1. Seleccionar la opción "CONTROL" en el MENU del HMI.
2. Escoger el control Proporcional Integral "PI".
3. Introducir el valor de las constantes.

Funcionamiento

El control Proporcional Integral (PI) elimina el error en estable que es provocado por el Proporcional. Para procesos rápidos y lineales este control es óptimo para su implementación. En ciertos procesos este control provoca inestabilidad si las constantes no están bien colocadas.

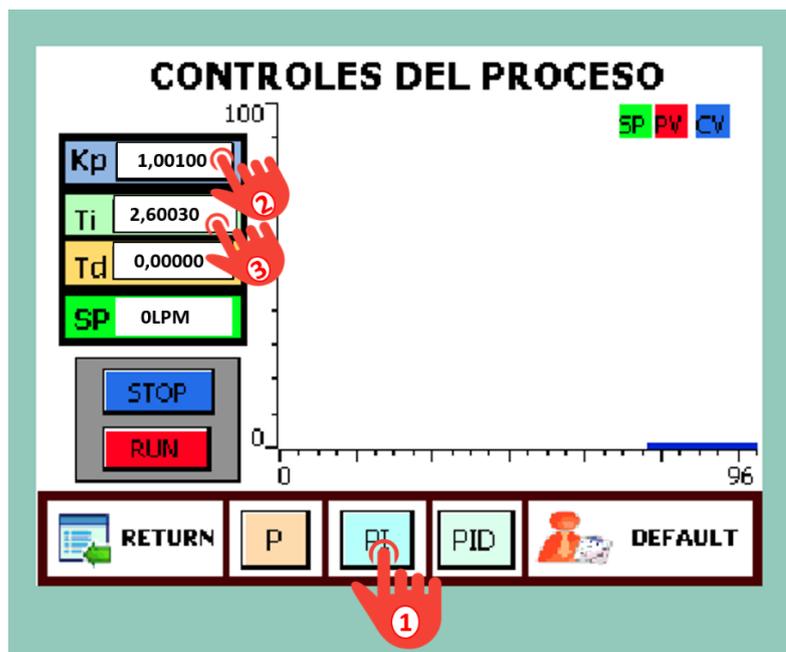


Figura 118: Selección del control (PI)

c. Control proporcional integral derivativo

Para seleccionar este control se realiza los siguientes pasos:

1. Seleccionar la opción "CONTROL" en el MENU del HMI.
2. Escoger el control Proporcional Integral Derivativo "PID".
3. Introducir el valor de las constantes.

Funcionamiento

El control PID es la combinación del Proporcional, Integral y Derivativo, posee las características de cada uno de ellos y presenta una gran estabilidad del proceso además su acción de control es rápida cuando se produce un error.

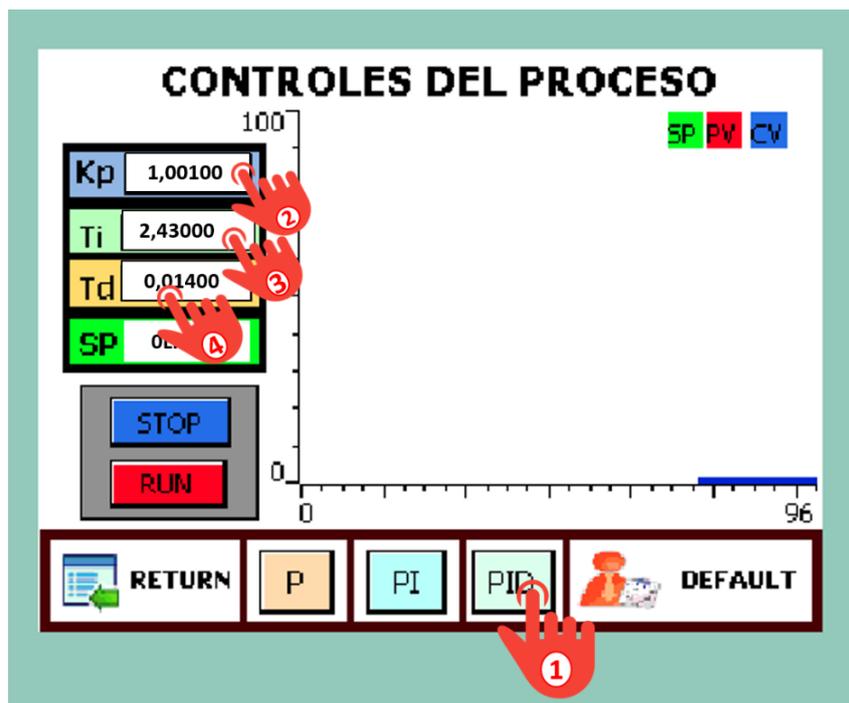


Figura 119: Selección del control (PID)

d. Default

La opción default selecciona las constantes adecuadas para el proceso, el valor se asignará automáticamente colocando las constantes para el control óptimo para el proceso.

3.9. Análisis de las curvas del proceso

Para monitorear el comportamiento de las curvas del proceso una vez seleccionado el tipo de control, acceder desde el menú del proceso en la opción "TENDENCIAS". En esta pantalla se tiene una representación del Set Point (SP), Process Value (PV) y Control Value (CV) en una gráfica. Se podrá cambiar del valor del SP para monitorear la variación del sistema acorde al control.



Figura 120: Selección de las “TENDENCIAS”

Para el análisis de las curvas se realizó mediante la toma de fotografías de la TOUCH PANEL, observando el comportamiento en el momento que se cambia el Set Point (SP). Las gráficas de las tres variables se diferencian mediante colores especificados en la pantalla.

- Verde para el Set Point (SP).
- Color Rojo para el Process Value (PV).
- Color Azul para el Control Value (CV).

De igual manera las opciones que tiene esta pantalla son las de retorno al menú principal, selección de los tipos de control y cierre de sesión.

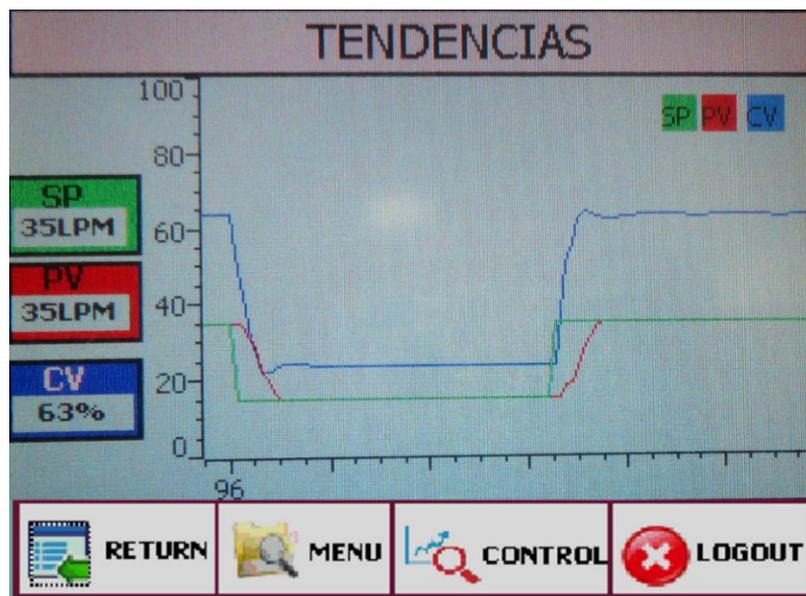


Figura 121: Pantalla de las TENDENCIAS del Proceso

La sintonización del control se realizó con el método del tanteo ya que no es un proceso complicado, su tendencia es lineal según la función de transferencia calculada en MATLAB.

3.9.1. Control proporcional

Para escoger este tipo de control ingresar desde el menú del proceso en la opción "CONTROL", seleccionar el control Proporcional (P) y por último ingresar la ganancia del control proporcional (K_p) adecuada para el proceso, los valores con los que se realizó la prueba se muestran en la (Tabla 25).

Tabla 25

Valores de prueba para el control proporcional.

SP LPM	Ganancia (K_p)	PV LPM	Respuesta
24	3	20	Estable con error
28	2,1	18±2	Inestable
30	5,3	26	Oscilante con error

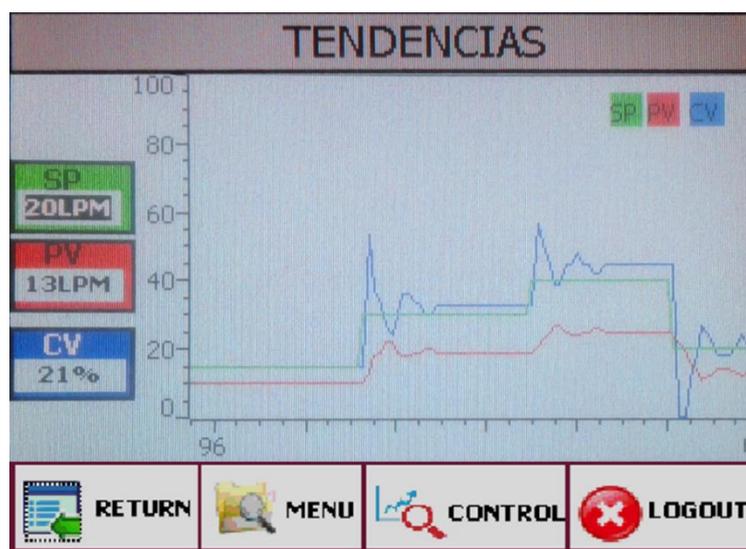


Figura 122: Tendencia del proceso con un valor de $K_p=3$

Al aplicar una perturbación en el proceso se observa que la curva tiene una pequeña estabilidad para compensar al proceso, sin embargo el error sigue de la misma manera en un valor aproximado a 4 LPM.

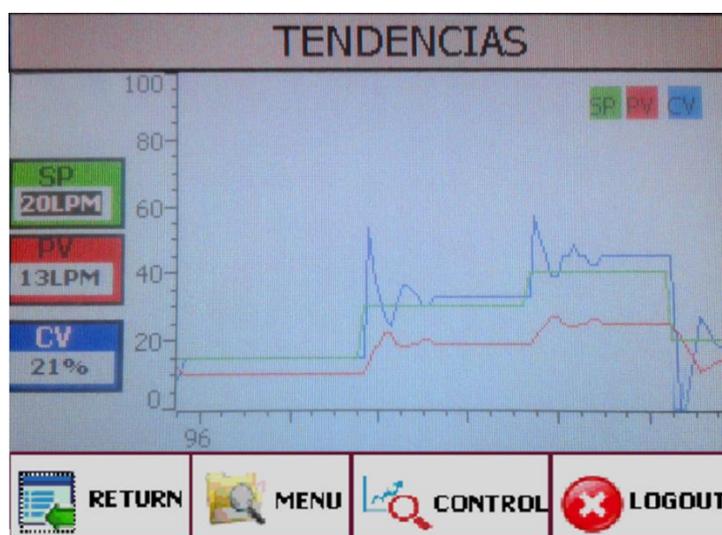


Figura 123: Tendencia ante una perturbación en el proceso

3.9.2. Control proporcional integral

Para seleccionar este tipo de control ingresar desde el menú del proceso en la opción "CONTROL", seleccionar el control Proporcional Integral (PI) y de

igual manera ingresar la ganancia del control proporcional (K_p) y el tiempo integral (T_i) adecuada para el proceso. En la **(Tabla 26)** se muestra los valores con los que se realizó las pruebas.

Tabla 26

Valores de prueba para sintonizar el control PI

SP LPM	Ganancia (K_p)	Tiempo Integral (T_i)	PV LPM	Respuesta
25	1,85	1,560	25	Estable con sobre impulso
15	0,98	2,00	15	Lento
35	1,0010	2,60030	35	Estable críticamente amortiguado

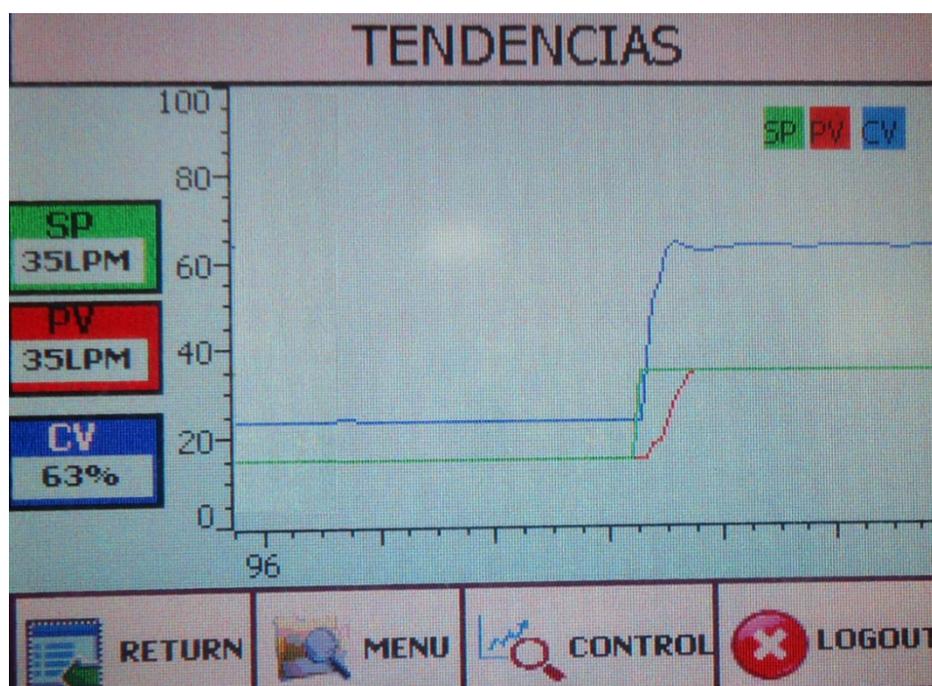


Figura 124: Tendencia del proceso con $K_p=1,0010$ y $T_i=2.4300$

Al aplicar una perturbación en el proceso se observa la curva de respuesta, y se observa la compensación del controlador. La estabilidad y velocidad del proceso es buena pero se observa que el Control Value (CV) es oscilante.

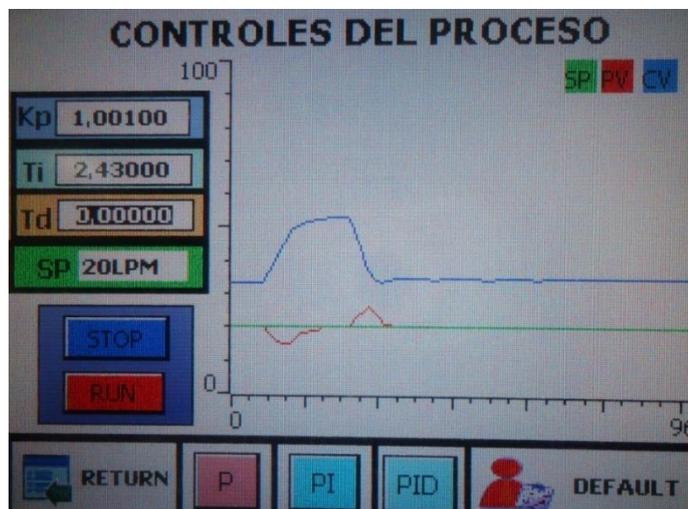


Figura 125: Cuerva de respuesta del proceso ante una perturbación

3.9.3. Control proporcional integral derivativo PID

Para seleccionar el control PID, ingresar desde el menú del proceso en la opción "CONTROL", seleccionar el control Proporcional Integral Derivativo (PID) y por último ingresar la ganancia del control proporcional (K_p), el tiempo integral y el tiempo derivativo. Los valores con los que se realizó la prueba se muestran en la siguiente (Tabla 27).

Tabla 27

Pruebas para sintonizar el control PID

SP LPM	(K_p)	(Ti)	(Td)	PV LPM	Respuesta
20	1	1,560	0,00456	20	Estable, lento sobre amortiguado
15	0,98	2,0000	0,001	15	Estable, Lento sobre amortiguado
35	1,0010	2,4300	0,01400	35	Estable críticamente amortiguado



Figura 126: Tendencias del proceso con $K_p=1.001$, $T_i=2,43$ y $T_d=0,014$

Al introducir una perturbación en el proceso se observa cómo reacciona el controlador ante este cambio inesperado, con una buena velocidad y estabilidad de la variable. Su respuesta es críticamente amortiguada y su variable de control es totalmente estable.



Figura 127: Cueva de reacción del proceso frente a una perturbación

3.10. Pantalla del proceso

Para ingresar a la opción "PROCESO" se lo realiza desde el menú, en esta pantalla se tiene la descripción gráfica del proceso, donde se indica el Set Point (SP), el Process Value (PV) y el Control Value (CV). Solamente el

usuario “ADMINISTRADOR” puede tener acceso a variar el SP dentro de este menú. En la **(Figura 128)** se muestra la pantalla del “PROCESO”.

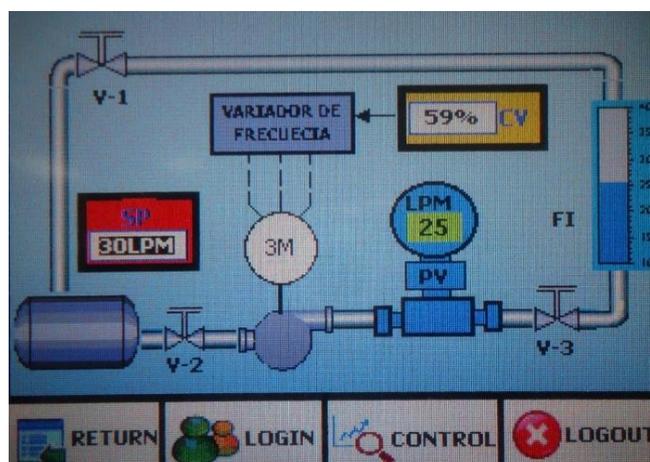


Figura 128: Pantalla del “PROCESO”

3.11. Avisos del HMI

Para el acceso a los avisos del sistema se lo realiza desde el menú del proceso en la opción “HISTORICOS”, esta pantalla indicada los errores producidos, los cambios de SP, la selección del control, porcentajes de la variable de control, etc.



Figura 129: Pantalla de Históricos del proceso

3.12. Funcionamiento de los controles con labview

Para la evaluación de los controles PID, DIFUSO y PREDICTIVO en la estación de caudal, se realiza los siguientes cambios de consigna **(Tabla 28)**.

Tabla 28

Cambios del valor de consigna (SP)

Tipo de variación	Variación
Ascendente	[10 – 25] LPM
Ascendente	[25 – 35] LPM
Descendente	[35 – 12] LPM
Ascendente	[12 – 40] LPM
Descendente	[40 – 20] LPM

3.12.1. Control proporcional integral derivativo

Para tener un controlador ajustado adecuadamente se puede sintonizar de varias formas, las cuales generan una respuesta adecuada para el proceso, las más conocidas son las siguientes, se realizan en lazo cerrado.

- Ajuste por ensayo y error.
- Método de Ziegler-Nichols o de ganancia límite.
- Utilizando Software Dedicado.

e. Ajuste por ensayo y error

En este método es necesario seguir una secuencia de pasos que se indican a continuación.

1. Eliminar las acciones integral y derivativa colocando T_i al máximo y T_d al mínimo.
2. Colocar K_p en un valor bajo y prender el controlador.
3. Aumentar la ganancia proporcional con pequeños incrementos hasta conseguir una oscilación continua o permanente esta sería la ganancia final.
4. Reducir dicha ganancia a la mitad.

5. Disminuir Tiempo integral (T_i) en pequeños incrementos hasta alcanzar nuevamente la oscilación continua. Colocar el T_i en un valor tres veces mayor.
6. Aumentar Tiempo derivativo (T_d) en pequeños incrementos hasta alcanzar nuevamente la oscilación. Sintonizar T_d en un tercio de ese valor.

Las desventajas de este método es que lleva mucho tiempo hacerlo, se tiene pérdidas de productividad del proceso o la disminución de la calidad del producto. No es aplicable a procesos que son inestables en bucle abierto porque dichos procesos suelen ser inestables para altos o bajos valores de la ganancia.

f. Método de ZIEGLER-NICHOLS o de ganancia límite

Se determina experimentalmente la ganancia final (K_c), al igual que en el método de ensayo y error. T_c es el período final asociado. Los parámetros del PID se calculan según la siguiente (Tabla 29).

Tabla 29

Fórmulas para las constantes del PID

Control	KP	Ti	Td
PID	$0.6 K_c$	$T_c/2$	$T_c/8$

g. Software MATLAB herramienta PID TUNING

Para este método es necesario el software MATLAB R2013b puesto que incluye el PID Tuning el cual de manera automática entrega las constantes del PID, esta herramienta necesita la función de transferencia de la estación en el dominio s previamente obtenida en apartados anteriores.

1. Se escribe la función de transferencia de la planta en el "Command Window" de MATLAB

```

x =

      1.021
-----
2.078e-06 s^2 + 0.002883 s + 1

Continuous-time transfer function.

```

Figura 130: Función de transferencia ingresada en MATLAB

2. En la parte de APPS de MATLAB se ejecuta la opción PID Tuning, donde se despliega una nueva ventana.

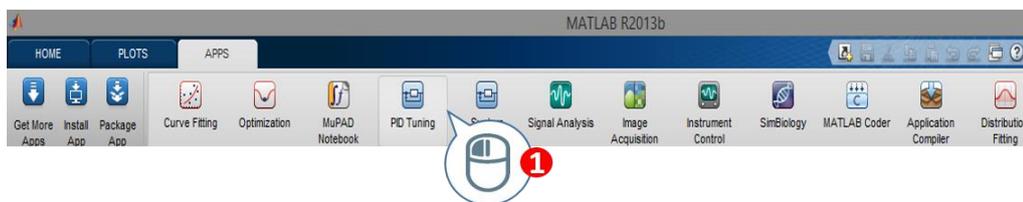


Figura 131: Icono del PID Tuning de MATLAB

3. En la pantalla se debe seleccionar el ícono "Import new plant model or baseline controller" para ingresar la función de transferencia de la planta.

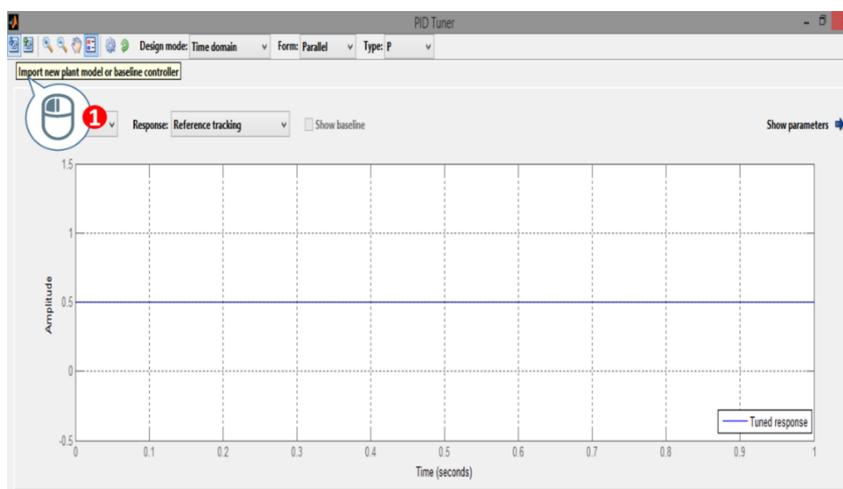


Figura 132: Pantalla del PID Tuning

Luego de esto se despliega una nueva ventana donde se muestra las variables del “Command Window”, se debe seleccionar la que contenga la función de transferencia de la estación y se da clic en “Import”.

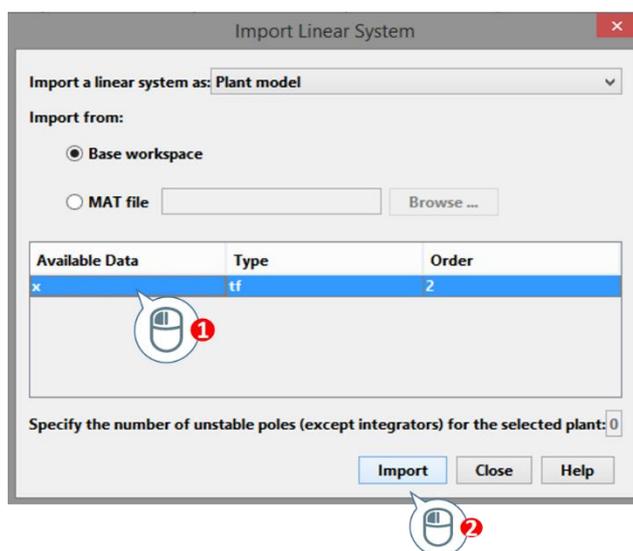
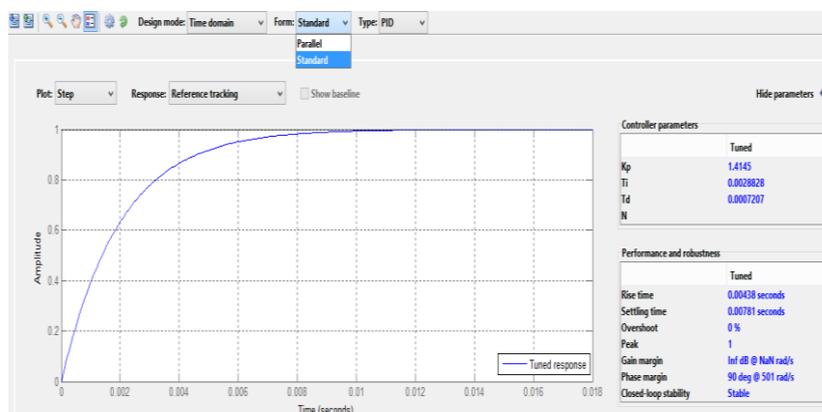
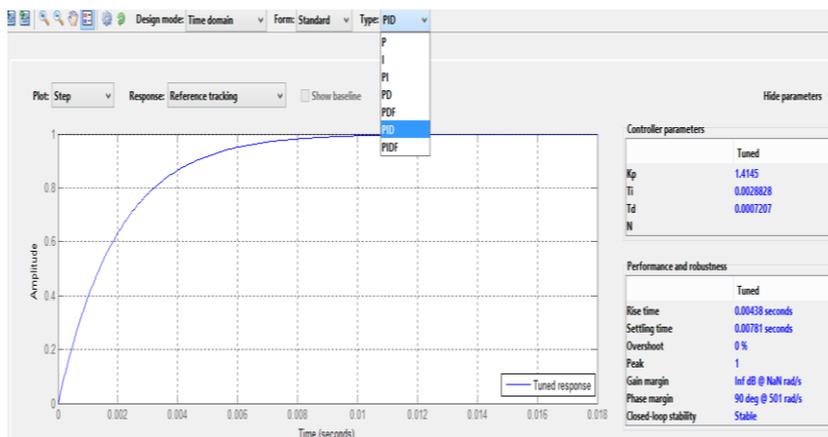


Figura 133: Cargar una nueva variable en PID Tuning

- Después de haber cargado la variable, la ventana indica de manera automática las constantes, se puede configurar si se necesita en formato KP, KI, KD o de manera KP, Ti, Td en la opción “Form”, mientras que en “Type” se podrá seleccionar el tipo de control a sintonizar.



(a)



(b)

Figura 134: (a) “Form” constantes, (b) “Type” sintonizar.

h. Pruebas del control PID

En el control PID para su sintonización se utilizó el software MATLAB, donde se obtuvo las siguientes constantes (**Tabla 30**), las cuales permiten obtener un control óptimo en la planta de caudal.

Tabla 30

Constantes del controlador PID

Constante	Valor	Dimensión
KP	1,4145	[adim]
Ti	0.0028	[min]
Td	0.00072	[min]

Los resultados obtenidos con los diferentes cambios de consigna, se muestran en la (**Figura 135**) y (**Figura 136**), en donde se puede apreciar la variable de control CV, las variables del proceso PV y SP respectivamente.

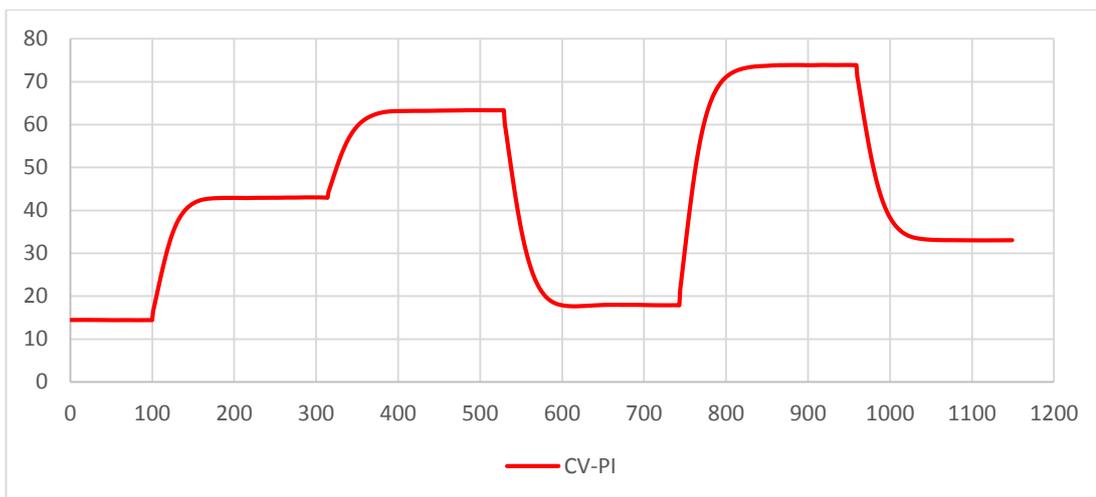


Figura 135: Variable de control (CV) generada por PID

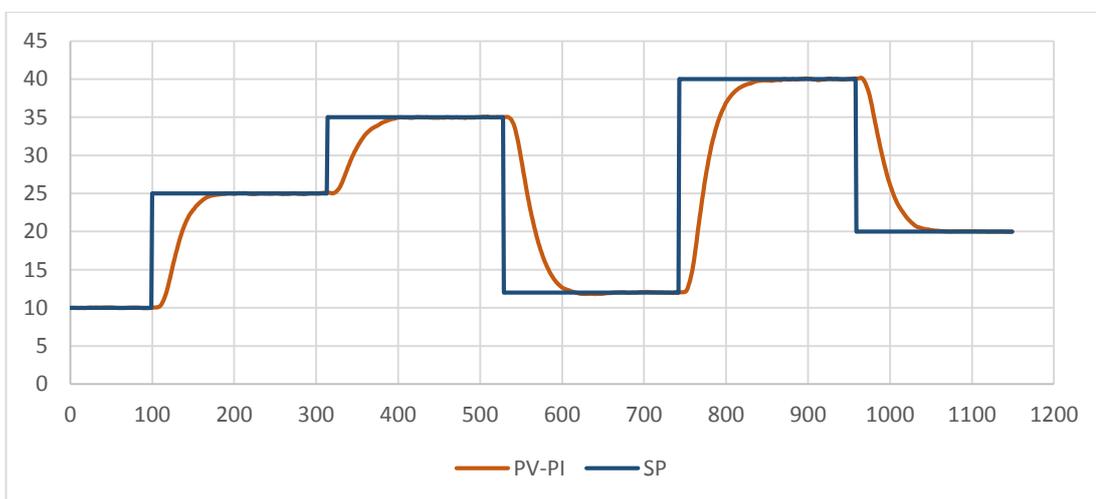


Figura 136: Resultados del controlador PID

3.12.2. Control lógico difuso

De la misma forma que el controlador PID, el Difuso fue sometido a las mismas variaciones de consigna, presentando como resultado las curvas de la **(Figura 137)** y **(Figura 138)**.

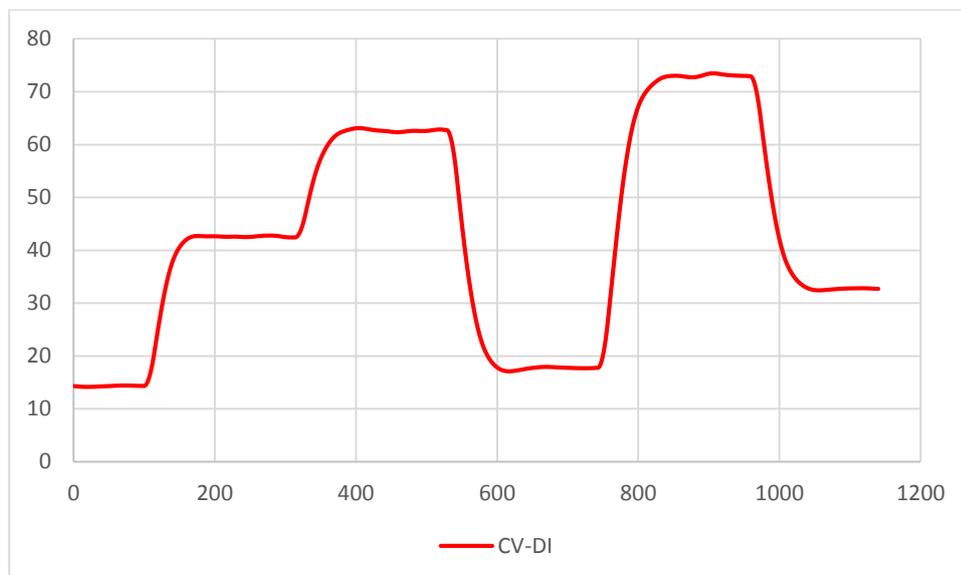


Figura 137: Variable de control (CV) generada por el Difuso

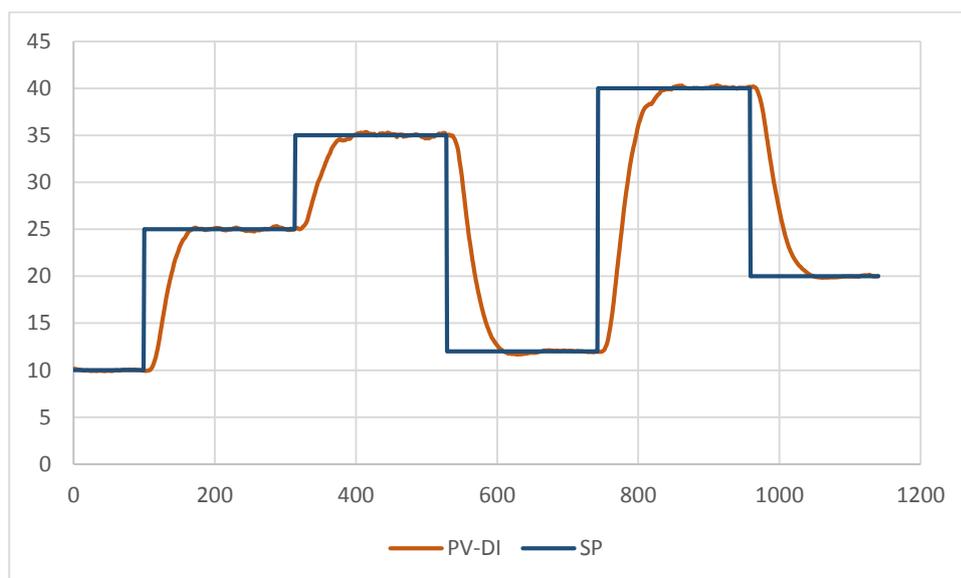


Figura 138: Resultados del controlador Difuso

3.12.3. Control predictivo

Al igual que los anteriores controles, el predictivo está asignado los mismos cambios de Set Point a un mismo intervalo de tiempo, mostrando la siguiente reacción frente a dichas variaciones (**Figura 139**) y (**Figura 140**).

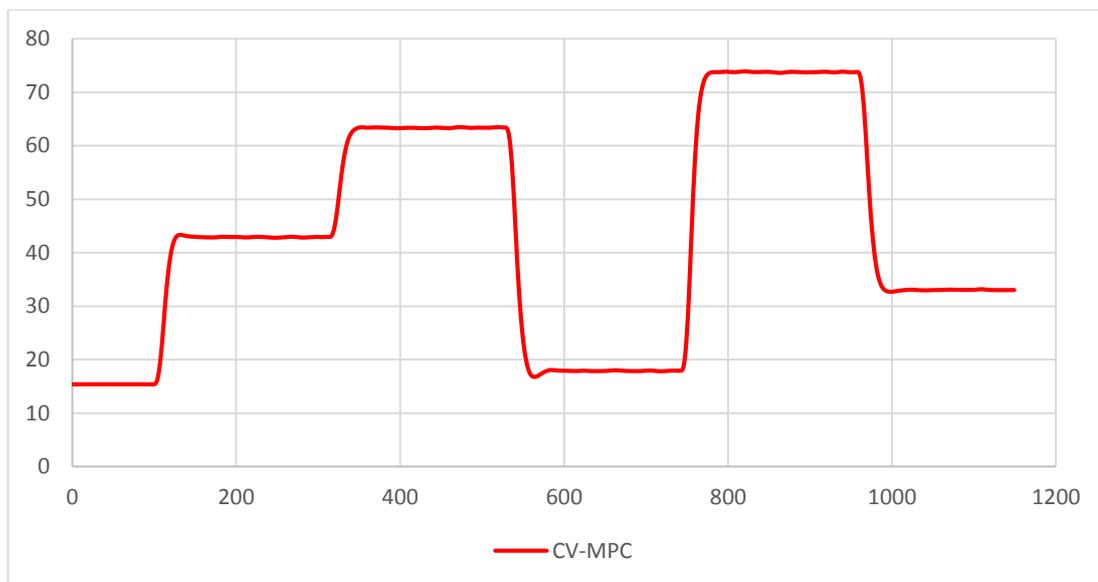


Figura 139: Variable de control (CV) generada por el MPC

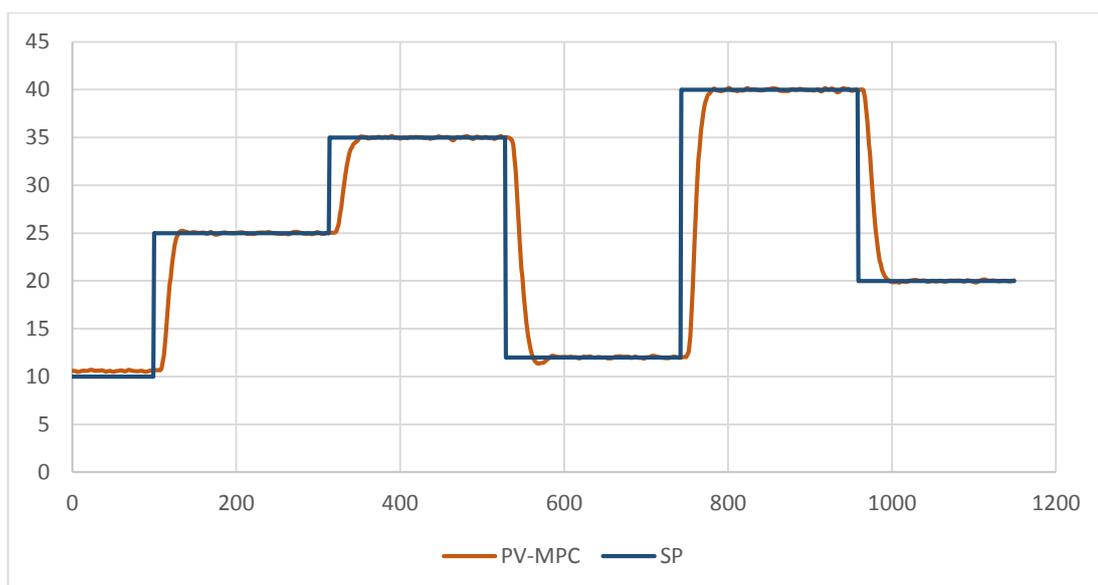


Figura 140: Resultados del controlador MPC

3.12.4. Análisis comparativo de los controladores

Al realizar el análisis y comparación de los controles implementados en LabVIEW es necesario obtener el tiempo de asentamiento, el sobre impulso al cambio de la consigna, y la respuesta del actuador. En la **(Figura 141)** y **(Figura 142)**, se muestran los resultados de las pruebas obtenidas, tanto en el controlador PID, como en el Difuso y Predictivo.

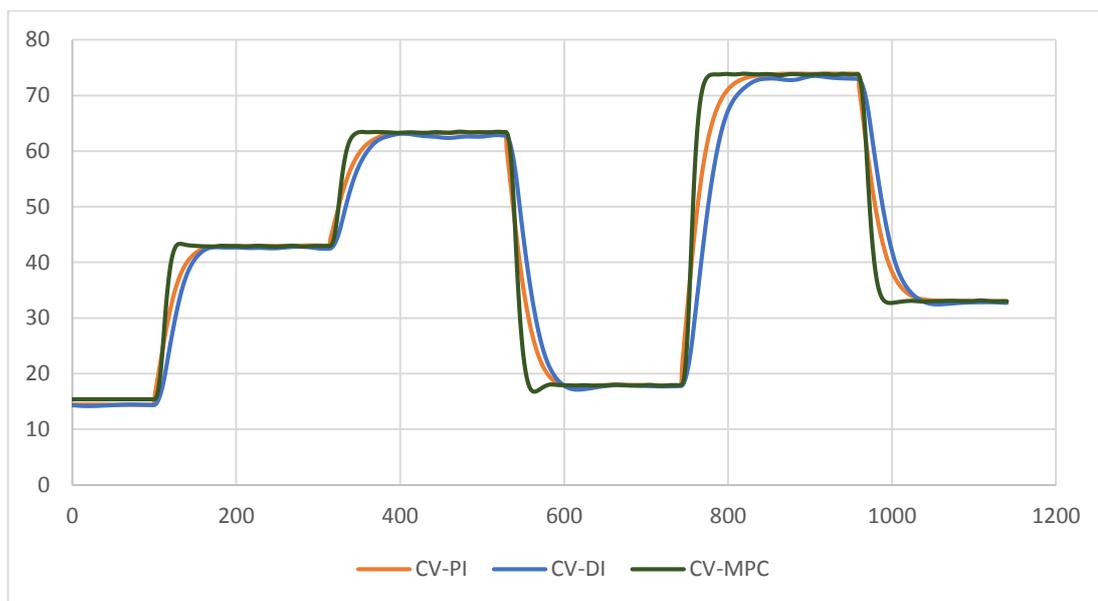


Figura 141: Variable de control (CV) PID, DIFUSO y MPC

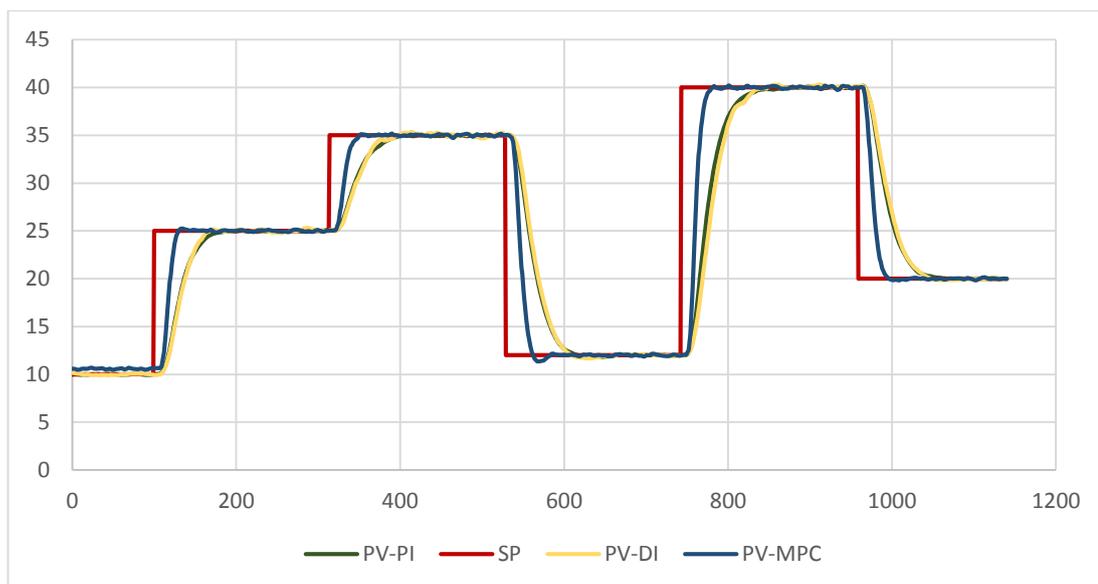


Figura 142: Resultados de los controladores PID, DIFUSO y MPC

En la **(Tabla 31)** se muestra una comparación resumida de los aspectos más importantes de las estrategias de control implantadas.

Tabla 31

Comparación de los controles PID, DIFUSO, MPC

Descripción	Consigna LPM	PID	DIFUSO	PREDICTIVO
Sobre impulso	Todas	Mínimo	Mínimo	Presenta sobre impulso a cambios bruscos de consigna Ejm: Rango de 35 a 12
T. elevación	10 – 25	10,8 seg	9,6 seg	3,8 seg
	25 – 35	12,9 seg	12,6 seg	5,8 seg
	35 – 12	13,6 seg	12,4 seg	5,1 seg
	12 – 40	16,2 seg	15,3 seg	7,3 seg
	40 – 20	13,5 seg	12,4 seg	5,1 seg
T. Asentamiento	Todas	Con las constantes definidas el tiempo se asentamiento es el más lento	Con los conjuntos difusos se obtiene un tiempo de asentamiento mayor del PID pero menor al MPC	Presenta el mejor tiempo de sentamiento de los tres controles.
Oscilaciones	Todas	oscilaciones mínimas	oscilaciones mínimas	Presenta oscilaciones mínimas, pero en valores de consigna de 10 y 40 el control sufre un número mayor de oscilaciones

3.13. Alcances y limitaciones

3.13.1. Alcances

En el proceso de implementación, análisis y funcionamiento de la estación de caudal se determinó los siguientes alcances:

- El módulo permite visualizar el comportamiento de la variable del proceso caudal (PV) entregando información requerida por los usuarios gracias al HMI desarrollado en la TOUCH PANEL y la comunicación con la PC mediante la NI MYDAQ.
- La estación permite hacer una red de procesos ya que el PLC Siemens 1500 cuenta con dos puertos Ethernet para la comunicación.
- Las estrategias de control se puede cambiar con la variación de K_p , T_i , T_d , adicional a esto se puede modificar el modo run o stop del PLC desde la TOUCH PANEL, mientras que los controles avanzados se los selecciona desde la PC.
- El PLC con sus módulos de entrada - salida y la NI MYDAQ permiten medir una la corriente de 4-20mA que entrega el transmisor y generar una salida variable de 0V a 10 V para el variador de frecuencia.
- El transmisor es un transductor a 4 hilos ya que puede ser alimentado con 120Vac y entregar una salida de 4-20 mA esto permite medir la cantidad de agua que recircula por la estación.
- Es posible visualizar el flujo de agua que recircula por la estación mediante un rotámetro que se encuentra en la línea de la tubería.

3.13.2. Limitaciones

De igual manera se pudo observar limitaciones del módulo didáctico, mismas que se detallan a continuación:

- El módulo no puede trabajar con una alimentación monofásica de 120 Vac, ya que el variador requiere una alimentación de 220 Vac.
- El variador de frecuencia no trabaja a 60 Hz ya que en este valor el caudal supera la escala del rotámetro, lo cual no permite realizar un control óptimo de la estación.
- Al momento de realizar las pruebas no se puede cerrar por completo las válvulas del sistema ya que la presión de la tubería aumenta y provocaría daños en la bomba centrífuga.

- La Programación realizada en LabVIEW no puede ser modificada en el archivo ejecutable.
- El rotámetro que está instalado en la estación como indicador de vidrio, no es muy proporcional al caudal que circula, puesto que al compáralo con el valor del transmisor presenta un pequeño error.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Al finalizar el proyecto se tiene las siguientes conclusiones:

4.1.1. MÓDULO DIDÁCTICO

- Se ha diseñado e implementado un módulo que permite el monitoreo y control automático de la variable flujo, que fomente la formación de los futuros profesionales, permitiendo realizar y familiarizarse con el control y automatización industrial.
- Se implementó el módulo de caudal con el propósito de ser una herramienta práctica en el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.
- El software TIA V12 permite la configuración, administración y programación del PLC S7-1500 y la TOUCH PANEL KTP-600, bajo la misma plataforma de programación brindando un entorno fácil e intuitivo con lo cual llega a ser un software con gran flexibilidad.
- El PLC S7-1500 permite realizar de una manera eficaz las distintas estrategias de control para la variable caudal, puesto que es un PLC de nueva generación con herramientas propias para el control tanto tradicional como de Motion Control, además el autómeta permite realizar un modo de control específico con solo anular las acciones reguladoras.
- La interfaz humano maquina HMI cumple con las funciones de monitoreo, control y supervisión del proceso, proporcionando al usuario un entorno amigable.

- El módulo didáctico permite la evaluación mediante el PLC de los controles Tradicionales P, PI y PID, y con la NI MYAQ la comparación entre controles PID, Difuso y Predictivo.
- La instalación de la brida se realizó de manera correcta sin presentar filtraciones en la tubería; se acoplo de manera apropiada hacia el transmisor sin causar daños o averías en el mismo, teniendo en cuenta lo solicitado por los estándares ASME/ANSI B16.5 y ASME/ANSI B16.47.

4.1.2. CONTROLES

- El control PID y Difuso no varían mucho en sistemas con tendencia lineal, pero existe mayor velocidad en el control Difuso tanto al cambio de la consigan ascendente y descendente, siendo esta comparación relativa puesto que al variar las constantes del control tradicional se puede hacer más veloz pero generando un mayor sobre impulso y aumentando el tiempo de establecimiento.
- El control predictivo cumple supera a los controles PID y Difuso, para ello la función de transferencia tiene que ser lo más aproximado a lo real para obtener resultados óptimos.
- En las estrategias de control implementadas tanto en el PLC como en la PC el CV no llega al 100% ya que la bomba abastece para un caudal mayor, al que se está trabajando.
- Para la implementación del control predictivo es necesario la función de transferencia y analizar el horizonte de control, el horizonte de predicción, el tiempo de muestreo y las funciones de costo, puesto que estos valores hacen que el control reaccione de diferentes maneras.

- En el control difuso las funciones de membresía poseen una dimensión igual, tanto en la entrada como en la salida debido a que el proceso posee una tendencia lineal.
- Para la implementación de controles los softwares de MATLAB y LabVIEW poseen sus propias librerías y herramientas que facilitan la implementación y el cálculo de varios aspectos importantes y necesarios de las estrategias de control

4.2. RECOMENDACIONES

- Antes de la manipulación tanto del Autómata como de sus accesorios es necesario leer detenidamente el manual con el objetivo de conocer todos los recursos que este posea y evitar un mal funcionamiento o daños al módulo.
- Se recomienda utilizar elementos industriales para la instalación eléctrica puesto que poseen normas de seguridad que permitirán la protección a elementos más delicados de la conexión.
- Tener en cuenta que el transmisor Rosemount 8732E es a cuatro Hilos por lo cual sus conexiones deben ser revisadas en el manual de usuario.
- Al realizar la conexión entre el PLC, la TOUCH y el ordenador es necesario que las IP asignadas no se repitan puesto que al existir una similar no se podrá realizar el enlace.
- Verificar mediante el símbolo del sistema del ordenador, que los elementos estén conectados mediante la instrucción PING y la IP que se le haya asignado al elemento de conexión.
- Verificar la versión de firmware tanto de la CPU del PLC como de los módulos de Entrada y Salida analógico, en caso contrario el software TIA no reconocerá a los elementos conectados y el Autómata informará que existe un error.
- Seleccionar de manera correcta la tubería según el manual del transmisor, en caso contrario la lectura será errónea o se deberá configurar el Rosemount para la red que se coloque en el sistema.
- Para la implementación de los controles es necesario conocer en su totalidad el sistema, para ello se obtiene la función de transferencia y

se debe realizar medidas tanto del transmisor como del voltaje que necesita el variador de frecuencia para asignar una frecuencia a la bomba centrífuga.

- Configurar el transmisor Rosemount de acuerdo a parámetros que demanda la estación de caudal y el rango que posee el rotámetro.
- Al momento de sintonizar el control PID mediante MATLAB es necesario verificar estas constantes de forma práctica puesto que la función de transferencia que se obtiene no cumple con un porcentaje del 100 por ciento con los datos ingresados en el software.
- Para los conjuntos difusos en una estación de tendencia lineal la distribución de estos debe ser de una manera uniforme tanto a la salida como a la entrada para obtener buenos resultados.
- Tener en cuenta los valores del horizonte de predicción y de control para esta estación el ultimo valor debe ser uno con un tiempo de muestreo no menor al de ejecución del programa
- Para la implementación del control Predictivo es necesario una tarjeta más potente que una DAQ, se recomienda realizar la obtención de datos con una NY MYRIO puesto que trabaja de una manera paralela y los tiempos de ejecución del programa disminuirían

BIBLIOGRAFÍA

- Bianchi, F. (2011). *Introducción al Control System Toolbox*. La Plata, Argentina.
- Bustos, D. (Mayo de 2011). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE DISPLAY*. Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.
- Creus, A. (2010). *Instrumentación Industrial*. México D.F.: Alfaomega.
- Ramírez, O. (Junio de 2008). *Simulación en simmechanics de un sistema de control difuso para el robot udlap*. México, D.F.: Puebla.
- Rojano, S. (2014). *Instrumentación y control en instalaciones de proceso, energía y servicios*. IC Editorial.

LINKOGRAFÍA

- Bombas Ideal S.A. (Julio de 2008). *Datos Técnicos de Hidraulica Bombas*. Obtenido de Bombas Ideal: <http://www.bombasideal.com/Catalogos/LIBRO%20HIDRAULICA%20%5BD-250112%5D.pdf> {21/02/2015}
- Delta Electronics. (Abril de 2008). *Manual de Usuario VFD-EL*. Obtenido de Delta Electronics: http://www.delta.com.tw/product/em/drive/ac_motor/download/manual/VFD-EL_manual_sp.pdf {25/02/2015}
- European Sealing Association. (Mayo de 2000). *Guía para la utilización segura de elementos de sellado*. Obtenido de European Sealing Association: http://www.europeansealing.com/uploads/resources/publications/ESA-FSA-Guia-Juntas-y-Bridas-009_98_ESP.pdf {01/03/2015}
- InfoPLC. (Agosto de 2014). *TIA Portal STEP 7 Professional*. Obtenido de InfoPLC: <http://www.infopl.net/descargas/106-siemens/software-step7-tiaportal/2101-versiones-tia-portal-siemens> {12/03/2015}
- Ingemecánica. (Agosto de 2005). *Sistema Internacional de Unidades de Medida*. Obtenido de Ingemecánica: <http://ingemecanica.com/tutoriales/unidadesdemedida.html#caudalvolumetrico> {15/03/2015}
- Instituto Argentino de Automación Industrial . (Octubre de 2010). *Introducción al Control Automático de Procesos*. Obtenido de Instituto Argentino de Automación Industrial: <http://descom.jmc.utfsm.cl/sgeywitz/sub-paginas/Piping/control%20de%20procesos.htm> {17/03/2015}
- Marchegiani, A. (Septiembre de 2004). *Bombas Centrífugas*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/wilfredojesus/bombas-13747095> {21/03/2015}
- Martín, G. (Junio de 2012). *Manual para el Diseño de una Red Hidráulica de Climatización*. Obtenido de E-Reading: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5091/> {27/03/2015}
- MathWorks. (Julio de 2015). *Control System Toolbox*. Obtenido de MathWorks: <http://www.mathworks.com/help/control/index.html> {28/03/2015}

- Mecánica Moderna. (15 de Mayo de 2010). Delta VFD-EL. Obtenido de Mecánica Moderna: <http://www.mecmod.com/fitxa.asp?id=414> {28/03/2015}
- Morilla, F. (Enero de 2007). Controladores PID. Obtenido de ETSI de Informática: <http://www.dia.uned.es/~fmorilla/MaterialDidactico/EI%20controlador%20PID.pdf> {28/03/2015}
- Ortiz Guevara, M. J. (17 de 10 de 2011). Diseño y construcción de un convertor DC/DC reductor elevador con control predictivo controlado por una tarjeta FPGA. Obtenido de Repositorio Digital EPN : <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4272> {02/04/2015}
- Pérez, M. (Febrero de 2011). Sistemas de Lógica Difusa. México. Obtenido de <http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/spanishwp/13fuzzylogicSP.pdf> {02/04/2015}
- ROSEMOUNT. (Diciembre de 2012). Guía de Instalación Rápida del Sistema de medidor de caudal magnético. Obtenido de Emerson Process Management: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/pm%20rosemount%20documents/00825-0109-4663.pdf> {02/04/2015}
- ROUSEMOUNT. (Enero de 2010). Manual de Consulta Rosemount 8732. Obtenido de Emerson Process Management: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/pm%20rosemount%20documents/00809-0109-4663.pdf> {05/04/2015}
- SIEMENS. (Noviembre de 2010). Manual del Sistema SIMATIC S7-1500. Obtenido de SIEMENS: http://www.infopl.net/files/descargas/siemens/infoPLC_net_s71500_system_manual_es-ES_es-ES.pdf {07/04/2015}
- SIEMENS. (Noviembre de 2012). SIMATIC STEP 7 en el TIA Portal. Obtenido de SIEMENS: http://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/es/brochure_simatic-step7_tia-portal_es.pdf {09/04/2015}
- SIEMENS. (Enero de 2013). Módulos SIMATIC S7-1500. Obtenido de SIEMENS: http://www.coevagi.com/Docs/Si_S7-1500.pdf {09/04/2015}
- SIEMENS. (Agosto de 2014). Hoja de Datos SIMATIC HMI KTP600. Obtenido de SIEMENS: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1318/0900766b813184f2.pdf> {15/04/2015}
- SIEMENS. (Julio de 2014). Manual de Salidas Analógicas SIMATIC S7-1500. Obtenido de SIEMENS: file:///C:/Users/Renato%20C/Downloads/s71500_aq_4xu_i_st_manual_es-ES_es-ES.pdf {15/04/2015}
- SIEMENS. (Julio de 2014). Manual entradas analógicas SIMATIC S7-1500. Obtenido de SIEMENS: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/205/59193205/att_112068/v1/s71500_ai_8xu_i_rtd_tc_st_manual_es-ES_es-ES.pdf {15/04/2015}

SIEMENS. (Julio de 2015). Datos Especificos S7-1500 . Obtenido de SIEMENS:
<https://mall.industry.siemens.com/mall/es/es/Catalog/Product/6AG1332-4BA00-7AA0> {17/05/2015}

Theler, G. (Junio de 2007). Controladores basados en lógica difusa. Obtenido de
<http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/96/1/1ThelerG.pdf> {15/06/2015}

Universidad del País de Vasco. (Febrero de 2013). Tutorial:Adquisición de Datos y acondicionamiento de la señal. Obtenido de Universidad del País de Vasco:
http://www.ehu.eus/daq_tutorial/Doc/indicegeneral.htm {12/07/2015}

ANEXOS



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

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los Sres. Christian Patricio Carvajal Cabrera y Luis Enrique Proaño Alomaliza. En la ciudad de Latacunga a los 23 días del mes de Noviembre del 2015.

Ing. Edwin Pruna
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Marco Pilatásig
CODIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Franklin Silva
DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO