

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS CIUDAD DE MÉXICO

DIVISION DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY**

Biblioteca
Campus Ciudad de México

**PUESTA EN OPERACIÓN Y APLICACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL
EN LA PLANTA DE PROCESOS AMATROL T5552**

Marianna Haydeé Gómez Vargas
Roberto Carlos Ruvalcaba Rincón



ASESOR: Dr. Ricardo Fernández del Busto y Ezeta

México, D.F.

Diciembre 2009

Contenido

Capítulo 1	Introducción	9
Capítulo 2	Problemática, Estado del Arte y Objetivos	10
2.1	Problemática	10
2.2	Estado del Arte	11
2.3	Objetivos	13
2.3.1	Objetivos Generales.....	13
2.3.2	Objetivos específicos.....	13
Capítulo 3	Descripción del sistema y control de procesos	15
3.1	Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552.....	15
3.2	Controlador PID	18
3.2.1	Controlador Proporcional.....	18
3.2.2	Control Proporcional Integral.....	19
3.2.3	Control Proporcional Derivativo	19
3.3	Reglas de sintonización de Ziegler-Nichols	20
3.3.1	Lazo Abierto.....	21
3.3.2	Lazo Cerrado	22
3.4	Sintonización de controladores PID para procesos Integrales	22
3.5	PLC Simatic S7-300.....	23
3.5.1	Datos	24
3.5.2	Tipos de Módulos.....	25
3.5.3	Módulo de entradas y salidas analógico	26
Capítulo 4	Caracterización del sistema	29
4.1	Convertidor I/P (IYT100)	29
4.2	Válvula neumática de diafragma (FCV100).....	30
4.3	Sensor de nivel ultrasónico	31
4.4	Transmisor de flujo (FIT100)	32
4.5	Sensor de nivel capacitivo	32
4.6	Módulo analógico del PLC Simatic S7-300.....	33
Capítulo 5	Identificación del Sistema.....	35
5.1	Lazo de Flujo.....	35
5.2	Lazo de nivel	40

Capítulo 6	Sistema Propuesto.....	44
6.1	Sistema de adquisición de datos	44
6.1.1	Entrada analógica de voltaje (Sensor ultrasónico de nivel)	44
6.1.2	Entrada analógica de corriente (Transmisor de flujo)	46
6.1.3	Salida analógica de voltaje (Convertidor I/P)	47
6.2	Interfaz de conexiones DAQ – Amatrol	48
6.3	Implementación del regulador PID en LabVIEW	51
6.4	Implementación del regulador PID en el PLC Simatic 300.....	55
6.4.1	Módulo PID FB 41 CONT_C CONT	55
6.5	Comunicación OPC.....	59
6.5.1	Servidor OPC.....	59
6.5.2	Cliente OPC.....	61
6.5.3	Monitoreo	63
Capítulo 7	Resultados y Conclusiones.....	66
Capítulo 8	Trabajo a Futuro	71
Capítulo 9	Anexos.....	72
9.1	Prácticas	72
9.1.1	Práctica 1 Conceptos Básicos	72
9.1.2	Práctica 2 Caracterización de sensores y actuadores	83
9.1.3	Práctica 3 Control on/off.....	92
9.1.4	Práctica 4 Control por medio de LabVIEW	98
9.2	Formato de datos en STEP 7	109
9.3	Tabla de Operandos.....	111
9.4	Acumuladores.....	112
9.5	Acceso a datos en una DB	112
9.6	Tabla de caracterización de Voltaje.....	114
9.7	Tabla de caracterización de Corriente.....	116
9.8	Tabla de Variables de FB41 CONT_C CONT.....	117

Contenido de Figuras

Figura 2.1 Conexión de LabVIEW a PLC	13
Figura 3.1 Componentes del Sistema	16
Figura 3.2 Controlador PID ideal	18
Figura 3.3 Acción Proporcional	18
Figura 3.4 Acción integral	19
Figura 3.5 Acción derivativa.....	19
Figura 3.6 Control PID en configuración ISA.....	20
Figura 3.7 Respuesta al escalón del lazo abierto	21
Figura 3.8 Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional.....	22
Figura 3.9 Salida oscilatoria del sistema.....	22
Figura 3.10 Almacenamiento de datos	24
Figura 3.11 Orden de módulos al ser llamados	25
Figura 3.12 CPU314C-2DP y sus salidas analógicas.....	26
Figura 3.13 Propiedades pestaña de <i>Entradas</i>	27
Figura 3.14 Propiedades pestaña de <i>Salidas</i>	28
Figura 4.1 Convertidor de voltaje a corriente.....	29
Figura 4.2 Gráfica de relación presión vs corriente del convertidor P/I	29
Figura 4.3 Gráfica de relación de flujo vs corriente de la válvula neumática	30
Figura 4.4 Gráfica de relación de flujo vs corriente de la válvula neumática	31
Figura 4.5 Gráfica de relación de voltaje vs nivel del sensor ultrasónico	31
Figura 4.6 Gráfica de relación de corriente vs gasto del transmisor de flujo.....	32
Figura 4.7 Gráfica de relación de voltaje vs corriente del sensor de nivel capacitivo	33
Figura 4.8 Gráfica de caracterización de voltaje.....	34
Figura 4.9 Gráfica de caracterización de corriente	34
Figura 5.1 Curva de reacción del lazo de flujo	37
Figura 5.2 Lazo abierto de flujo, Simulink	37
Figura 5.3 Gráfica de lazo abierto de flujo, Simulink	38
Figura 5.4 Lazo cerrado de control de flujo	39
Figura 5.5 Gráfica de lazo cerrado de control de flujo.....	39
Figura 5.6 Lugar geométrico de las raíces del control de flujo.....	39
Figura 5.7 Curva de reacción de lazo de nivel	40
Figura 5.8 Lazo abierto de nivel, Simulink	41
Figura 5.9 Gráfica de lazo abierto de nivel, Simulink.....	41
Figura 5.10 Lazo cerrado de control de nivel	41
Figura 5.11 Gráfica de lazo cerrado de control de nivel	42
Figura 5.12 Lugar geométrico de las raíces del control de nivel	42
Figura 5.13 Acercamiento del lugar geométrico de las raíces del control de nivel.....	43
Figura 6.1 Asistente de configuración	44
Figura 6.2 Ventana de configuración	45
Figura 6.3 Conexión de la señal de entrada ai0.....	45
Figura 6.4 Ventana de configuración	46

Figura 6.5 Conexión de la señal de entrada ai1	46
Figura 6.6 Ventana de configuración	47
Figura 6.7 Conexión de la señal de salida ao0	47
Figura 6.8 Gráfica característica del convertidor V-I.....	48
Figura 6.9 Convertidor V-I con carga flotada.....	48
Figura 6.10 Diagrama eléctrico de la interfaz de conexiones.....	49
Figura 6.11 Diagrama esquemático de la interfaz de conexiones.	50
Figura 6.12 Diagrama PCB de la interfaz de conexiones.	50
Figura 6.13 Vista externa de la interfaz de conexiones y mapa de conexiones	50
Figura 6.14 Interconexión DB 9 – DAQ.....	51
Figura 6.15 Interfaz Gráfica del Usuario.....	52
Figura 6.16 Selectores de lazo de control	52
Figura 6.17 Campos de ajuste PID.....	52
Figura 6.18 Ventana de graficación PV, SP, U(t) y E(t)	53
Figura 6.19 Escalamiento del sensor ultrasónico	53
Figura 6.20 Escalamiento del transmisor de flujo.....	54
Figura 6.21 Des escalamiento para el convertidor V-I	54
Figura 6.22 Diagrama a bloques del módulo FB 41	55
Figura 6.23 Tabla de Símbolos	56
Figura 6.24 Parte del Diagrama de bloque del FB 41.....	56
Figura 6.25 Gráfica de caracterización del sensor ultrasónico.....	58
Figura 6.26 Gráfica de normalización del sensor ultrasónico.....	58
Figura 6.27 Selección del canal de comunicación del servidor OPC	59
Figura 6.28 Configuración del hardware en Step 7.....	60
Figura 6.29 Configuración de variables a monitorear	61
Figura 6.30 Ventana de configuración del cliente OPC.....	62
Figura 6.31 Ligado de variables a monitorear	63
Figura 6.32 Configuración de variables ligadas	63
Figura 6.33 Diagrama básico de control ON-OFF.....	64
Figura 6.34 Programación en Step 7	64
Figura 6.35 Monitoreo de variables por medio de LabVIEW	65
Figura 6.36 Carátula final de la Interfaz Gráfica del Usuario.....	65
Figura 7.1 Gráfica de operación del lazo de nivel	67
Figura 7.2 Filtrado de la señal de control	67
Figura 7.3 Gráfica de operación del lazo de flujo	68
Figura 7.4 Verificación monitoreo de llenado por OPC.....	69
Figura 7.5 Verificación monitoreo de vaciado por OPC	69

Contenido de Tablas

Tabla 3.1 Enumeración de los elementos del sistema	18
Tabla 3.2 Reglas de sintonización Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta.....	21
Tabla 3.3 Reglas de sintonización de Ziegler-Nichols en lazo cerrado	22
Tabla 3.4 Reglas de Sintonización de A. Visioli	23
Tabla 3.5 Direccionamiento de datos.....	24
Tabla 3.6 Entradas analógicas.....	27
Tabla 3.7 Salidas analógicas.....	27
Tabla 5.1 Sintonización de diferentes lazos, Expertune.....	38

Capítulo 1 Introducción

Una de las áreas donde el ingenio humano ha realizado un gran desarrollo es en el control total o parcial de los procesos industriales. Es por esto, que el proyecto final de esta materia está orientado al Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552.

El control de procesos de esta planta es la aplicación de diversas materias que forman el plan de estudios de la carrera Ingeniero en Tecnología Electrónicas. En este proyecto se logró poner en práctica muchas de las teorías y principios vistos a través de cuatro años y medio de estudios.

Este documento tiene como finalidad principal presentar un trabajo enfocado al control de procesos del Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552, en el cual existen muchos tipos de elementos y sistemas con diferentes características. Para este proyecto se trabajó con dos grandes instrumentos de control: un PLC, Simatic S7 300 de Siemens y el programa de LabVIEW de National Instruments. Ambos elementos fueron obtenidos por medio del laboratorio de electrónica del Tecnológico de Monterrey campus Ciudad de México.

Este proyecto es una excelente vía para el aprendizaje del alumno, ya que ayuda a la capacidad de abstracción y solución de problemas en un ambiente de simulación industrial. Durante el transcurso de los semestres se han estudiado diferentes teoremas y principios los cuales se dan en condiciones ideales o sin tomar en cuenta algunos factores. La implementación de los cálculos en el Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552 ayuda a entender toda la teoría necesaria, pero también te ayuda a ser capaz de solucionar problemas donde esos factores se hacen presentes.

Capítulo 2 Problemática, Estado del Arte y Objetivos

2.1 Problemática

El control de automatización de procesos está relacionado con mantener variables de proceso como son la temperatura, presión, flujo, composición y otros valores proporcionales. Durante cualquier tipo de proceso pueden existir cambios o alteraciones repentinas e impredecibles, y si no se toma una acción apropiada, estos cambios pueden dañar el proceso permanentemente, alterando así aspectos importantes como la seguridad en el proceso y calidad del producto.

En cualquier proceso automatizado existen variables que no se pueden descuidar. Primero se observa la variable controlada o variable de proceso que representa el factor que se debe mantener a un cierto nivel. Dicha variable debe estar en un nivel óptimo o deseado, comúnmente conocido como punto de operación. Por lo tanto, se puede enunciar que el objetivo de un sistema de control de procesos es ajustar la variable manipulada para mantener la variable de proceso en su punto de operación a pesar de las posibles alteraciones ajenas al sistema.

Un sistema de control de procesos proporciona control sobre algunas áreas de una industria de procesos; normalmente involucran líquidos o gases. Una aplicación del control de procesos es el control de nivel de un líquido en un tanque. Para mantener un nivel de solución constante, el líquido de salida del tanque es controlado por medio de apertura y cerrado de una válvula y, la entrada, se da por medio de una válvula proporcional.

En la industria de procesos, el control de nivel y de flujo son dos lazos sumamente importantes, estos se encuentran en una gran diversidad de industrias como la petrolera, papelera, alimenticia, farmacéutica, entre otras. El Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552 es una plataforma didáctica para enseñar los principios básicos del control de procesos industriales. Este proyecto se centra en el estudio de ambos lazos. En particular, el control que se puede desarrollar en este sistema puede ser a través de un PLC y a través de LabVIEW con sus tarjetas de adquisición de datos.

El uso apropiado del Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552 da como resultado una plataforma operativa, la cual dará al alumno la habilidad de desarrollar su entendimiento en el área de automatización y control.

2.2 Estado del Arte

Desde 1942, cuando Ziegler y Nichols desarrollaron sus reglas de sintonización, el control PID (proporcional-integral-derivativo) ha dominado ampliamente el campo de control de sistemas.

La era digital y las capacidades computacionales han reavivado algoritmos de sintonización PID existentes desde hace tiempo y han propiciado el surgimiento de nuevos tales como el PID difuso, redes neuronales PID o algoritmos genéticos PID. El resultado de todo esto probablemente lo resume un dato mostrado en el artículo de Li et al (Y. Li, 2006), también señalado por Alfaro (Alfaro, 2002) y Aström (K. J. Aström, 1995); el cual muestra que hasta la fecha más del 90% de los sistemas de control prácticos utilizan el controlador PID. (García, 2005)

Dos elementos donde se puede implementar el control proporcional-integral-derivativo son el PLC y LabVIEW.

Un Controlador Lógico Programable ó PLC, por sus siglas en inglés, es un equipo electrónico programable en lenguaje no informático, diseñado para controlar en tiempo real un ambiente industrial de procesos secuenciales.

Un PLC trabaja en base a la información recibida por sus entradas (analógicas y/o digitales) y el programa lógico interno. En la industria se utilizó en un principio para resolver problemas de secuencias en la maquinaria, pero, en la actualidad, sus aplicaciones en el control de procesos son esenciales debido a su costo, se utilizan fundamentalmente en procesos de maniobras de máquinas, control y señalización. La aplicación de un PLC abarca procesos industriales de cualquier tipo y ofrecen conexión a red; esto permite tener comunicado un PLC con una PC y otros dispositivos al mismo tiempo, permitiendo hacer funciones de monitoreo, estadísticas y reportes (Automatización Sync, 2009) (Sin autor, 2009). Entre sus ventajas se encuentran sus reducidas dimensiones, la facilidad de su montaje, la posibilidad de almacenar los programas para su posterior y rápida utilización, la modificación o alteración de los mismos, ahorro de costos en mantenimiento.

Las funciones básicas de un PLC, son las de detección (lectura de entradas), diálogo hombre- máquina, programación y control de procesos discretos y continuos. En algunos PLC se llevan incorporadas funciones que permiten el control de procesos continuos.

Disponen de módulos de entrada y salida analógicas y la posibilidad de ejecutar reguladores tipo PID, e incluso controladores difusos.

Anteriormente se utilizaban los sistemas de relevadores pero las desventajas que presentaban eran bastantes; los PLC se hicieron para sustituir sistemas basados en relevadores.

LabVIEW es una plataforma de National Instruments, este software es líder en la industria para sistemas de control, pruebas y diseño. Es un ambiente de desarrollo gráfico con funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de mediciones y presentaciones de datos. Se puede utilizar LabVIEW para numerosas aplicaciones de control de procesos y automatización. Se pueden realizar medidas y control de alta velocidad y con muchos canales. Para aplicaciones de automatización industrial complejas y a gran escala, los programadores de LabVIEW han diseñado el módulo de Datalogging and Supervisory Control, con el que se puede monitorear gran número de puntos de E/S, comunicarse con controladores industriales y redes y proporcionar control basado en PC. (Villa, 2009), (NI, 2009)

Para National Instruments existen 3 métodos para conectar LabVIEW a cualquier PLC. Estas son E/S Digital y Análoga Básica, Modbus TCP y, Modbus Serial y OPC.

OPC (*OLE for Process Control*) es un estándar de comunicación que se desarrolló en 1996, éste especificó la comunicación de datos en una planta en tiempo real y entre dispositivos de control de diferentes fabricantes, esto se realiza por medio de un mismo servidor OPC, así se elimina la necesidad de que todos los programas cuenten con drivers para comunicarse, sólo es necesario uno. El estándar es controlado, actualmente, por la Fundación OPC y ha sido renombrada a Acceso estándar de Datos OPC. La versión actual de la especificación de Acceso de Datos OPC es OPC Data Access 3.0.

Escrito el servidor OPC para un dispositivo en particular, puede ser utilizado nuevamente por una aplicación capaz de actuar como un cliente OPC, un ejemplo es LabVIEW. (NI, 2009)

Con la versión 8 y más actuales de LabVIEW se puede tener a éste como un servidor OPC, esto significa, que se puede tener cualquier tipo de datos que tenga en un servidor nativo OPC utilizando una variable compartida.

El módulo de LabVIEW DSC es el responsable de la comunicación del de Cliente OPC a LabVIEW, así se posee un rápido desarrollo de aplicaciones de medición distribuida, control y monitoreo de alta cuenta de canales. Todo esto mejora la seguridad en pantallas principales, el acceso a datos automáticamente, así como agregar un sistema de alarma, escala y seguridad a la variable compartida. Así el módulo LabVIEW DSC proporciona, a LabVIEW la funcionalidad de operar como un cliente OPC abierto, proporcionando una conectividad fácil con cualquier servidor implementando los fundamentos OPC a partir de la interfaz del servidor OPC. "El Módulo DSC encuentra todos los servidores instalados OPC y lee cualquier información disponible acerca de las capacidades del servidor y selecciona directamente del servidor." (NI, 2009). En la Figura 2.1 se observa el proceso de la conexión de LabVIEW con el PLC.

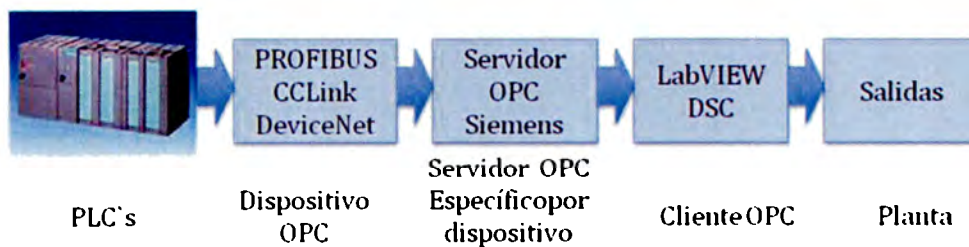


Figura 2.1 Conexión de LabVIEW a PLC

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivos Generales

- Poner en operación el Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552, entendiéndose como tal la puesta en marcha del proceso de llenado, además de controlar el flujo y el nivel de líquido de manera automática o manual.

2.3.2 Objetivos específicos

- Conocer la operación de cada componente del sistema.
- Revisar y caracterizar la operación de cada uno de los componentes presentes en el Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552.
- Determinar las funciones de transferencia de los componentes principales del Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552.
- Diseñar e implementar un controlador PID en el Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552 para el lazo de nivel y flujo.

- Realizar el control del lazo de nivel y flujo por medio de la plataforma de LabVIEW de National Instruments.
- Realizar un manual de prácticas de laboratorio para el uso adecuado del Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552.
- Realizar comunicación OPC por medio del PLC-LabVIEW-Amatrol

Capítulo 3 Descripción del sistema y control de procesos

El Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552 es un sistema compuesto por varios elementos. En este capítulo se desglosa cada uno de sus componentes.

El regulador PID es parte básica del proyecto por lo que en esta sección del documento se detalla cada una de las acciones que conforman este regulador. Las reglas de sintonización que se utilizaron son también incluidas en este capítulo. Por último, se describe al PLC S7-300 de Siemens.

3.1 Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552

El fabricante Amatrol Inc. “El Sistema de Control de Procesos de Flujo y Nivel T5552 pone a prueba dos de los tipos de control de proceso más comunes, el nivel de líquidos y el flujo, y los conceptos básicos en los cuales otros sistemas están basados. Con esta máquina los usuarios aprenden a calibrar, ajustar, instalar, operar y conectar sistemas de control de procesos en aplicaciones industriales” (Amatrol, 2009).

El T5552 incluye una red de control de procesos, un panel de control y una estación de trabajo. Todos los componentes están montados y conectados en un circuito cerrado de tuberías para controlar el flujo de agua entre dos tanques o el nivel del líquido en uno. Todos los componentes están conectados a entradas banana en el panel de control permitiendo así medir señales y conectar los componentes en una amplia variedad de configuraciones.

Existen dos tipos de control: con relevadores y con un controlador PID que en este caso no se encuentra presente. El control por relevadores incluye interruptores manuales, relevadores, válvulas solenoides e interruptores de flotación para poder realizar el control automático de nivel de líquidos on/off, la opción de utilizar control por PLC, nos permite tener ambos controles, on/off y PID.

A continuación se describen los componentes del T5552, los cuales pueden ser observados en la Figura 3.1, cada componente posee un número y su descripción se explica en seguida, en la Tabla 3.1. (Amatrol, 2005)

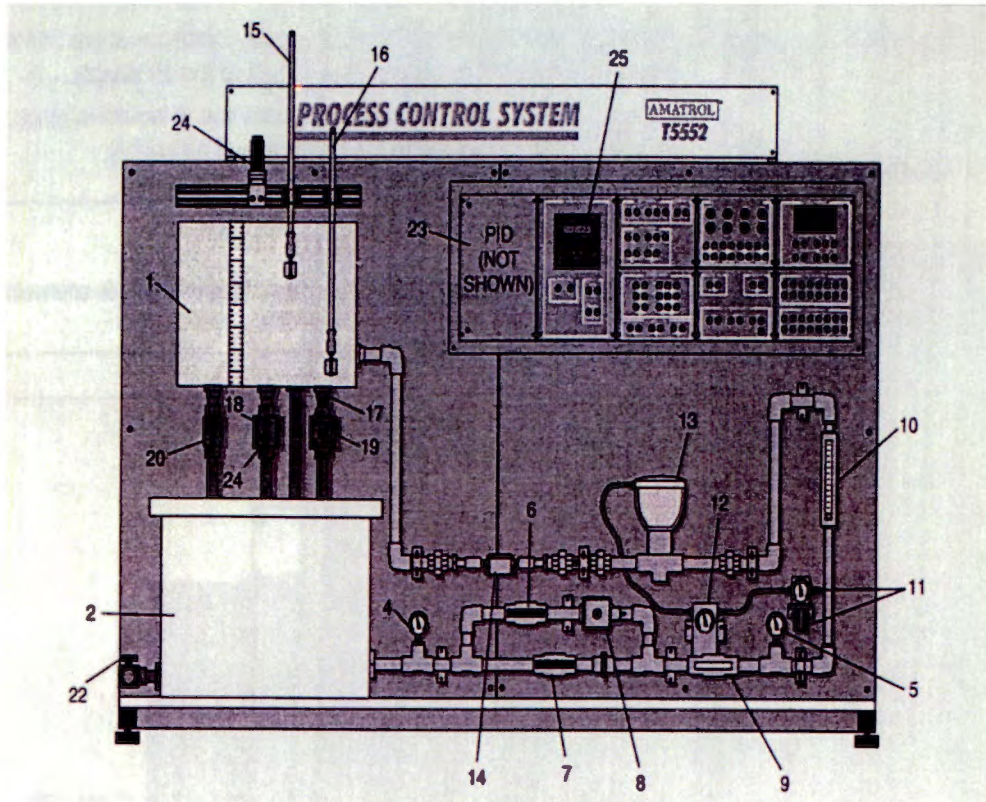


Figura 3.1 Componentes del Sistema

Elemento	Descripción	Observaciones	Referencia
1	Tanque de proceso	Tanque donde la red de tuberías tiene su fin. Es el punto donde el nivel de líquido es monitoreado por medio de sensores. Es el punto donde todo el proceso toma lugar. El agua es regresada al tanque de depósito por medio de válvulas.	-
2	Tanque de depósito	El proceso de fluido inicia en esta parte, donde al agua esta almacenada.	-
3	Bomba	Localizada en el interior del tanque de depósito, es del tipo centrífuga. La bomba extrae el agua del tanque y lo traslada a la red de tuberías. El agua ayuda a regular la temperatura de la bomba y por tanto previene de un sobrecalentamiento. Para que no exista ningún problema con esto, <i>el tanque de depósito debe ser llenado hasta 4 pulgadas antes del borde superior.</i>	-
6	Válvula Manual	Restringe el flujo a través de su respectiva tubería	HV 100-A
7	Válvula Manual	Restringe el flujo a través de su respectiva tubería	HV 100-B
8	Válvula Solenoide	Restringe el flujo de la tubería secundaria.	SV 100-A

9	Válvula manual de control de flujo	La válvula FV 100 es dosificadora y es la principal controladora manual de flujo a la red de tuberías. La escala precisa de 180° permite un ajuste exacto del proceso de dosificación. (Georg Fischer S.A, 2009)	FV 100
10	Medidor de flujo	Tipo rotámetro, el cual provee una identificación visual de la tasa de flujo a través del sistema.	FI 100
11	Regulador de presión con medidor	Controla la fuente de aire que es enviada al convertidor I/P.	PC100 PI 100-C
12	Convertidor de corriente a presión	Es un acondicionador de señal, que convierte una señal eléctrica de un controlador a una señal neumática para controlar la válvula neumática. Tiene una corriente de entrada nominal de 4 a 20 mA, mientras que la salida de presión es de 3 a 15 psi.	IYT-100
13	Válvula neumática de diafragma	Válvula de control de flujo que puede ser de agua, vapor o gas.	FCV 100
15	Interruptores de nivel tipo flotante 1	Se extienden a través de tanque de proceso. Esto da la ventaja de no sólo tener un sensor de nivel, sino también "sensores" flotantes que indican cuándo el nivel de agua ha llegado a un punto fijado por su posición.	LSH 200-A
16	Interruptores de nivel tipo flotante 2	Se extienden a través de tanque de proceso. Esto da la ventaja de no sólo tener un sensor de nivel, sino también "sensores" flotantes que indican cuándo el nivel de agua ha llegado a un punto fijado por su posición.	LSH 200-B
18	Válvula solenoide	Drenado del tanque de proceso.	SV 100-B
19	Válvula solenoide	Drenado del tanque de proceso.	SV 100-C
20	Válvula manual	Drenan el tanque de proceso	HV 300
21	Válvula manual	Drenan el tanque de proceso	HV 100-C
22	Válvula manual	Drena el tanque de depósito	HV 400
25	Transmisor de flujo	Es un instrumento que se interconecta con el transductor que está acoplado a la tubería. El transmisor tiene la capacidad no sólo de medir el flujo en galones por minuto, sino también en Amperes, también lleva un registro de la cantidad de galones que se han procesado desde el momento del encendido, haciendo las veces de un totalizador. Al	FIT 100

llegar a un valor definido por el usuario, da la opción de control de relevador pudiendo incluso indicar los segundos en los que el colector estará abierto o cerrado.

Tabla 3.1 Enumeración de los elementos del sistema

3.2 Controlador PID

Un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es un mecanismo de control por retroalimentación que se utiliza en sistemas de control industrial. Un controlador PID cumple las siguientes acciones:

- Responder inmediatamente ante la presencia de un error.
- Corregir el error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener calculándolo y luego sacando una acción correctora que puede ajustar al proceso acorde.

El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El controlador PID ideal se muestra en la Figura 3.2.

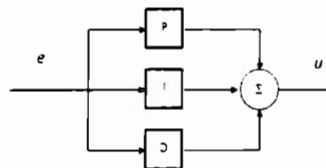


Figura 3.2 Controlador PID ideal

3.2.1 Controlador Proporcional

Proporcional significa que el cambio presente en la salida del controlador es algún tipo del porcentaje de cambio en la medición. Este múltiplo es llamado ganancia del controlador. Para algunos controladores, la acción proporcional es ajustada por medio de tal ajuste de ganancia, metras que para otros se usa una "banda proporcional". Ambos tienen los mismos propósitos y efectos. La acción proporcional determina la reacción del error actual. La Figura 3.3 muestra el diagrama del sistema típico y la Ecuación 3.1 muestra la variable de control $u(s)$ en función del error $e(s)$.

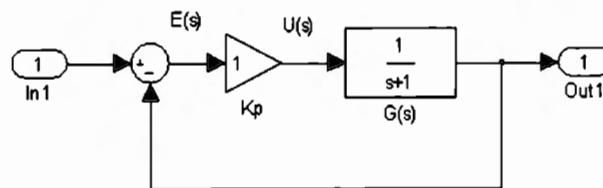


Figura 3.3 Acción Proporcional

$$U(s) = K_p \cdot E(s) \tag{3.1}$$

3.2.2 Control Proporcional Integral

La acción integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. Para eliminar error de estado estacionario, hay que sumar la integral del error a la señal de control. La Figura 3.4 muestra el diagrama a bloques de la acción proporcional integral, mientras que La Ecuación 3.2 describe matemáticamente la acción proporcional integral.

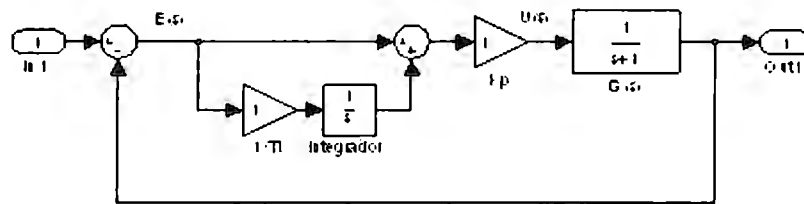


Figura 3.4 Acción integral

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) \tag{3.2}$$

3.2.3 Control Proporcional Derivativo

La acción derivativa determina la reacción del tiempo en el que el error se produce. La Figura 3.5 muestra el diagrama a bloques de la acción proporcional derivativa. La Ecuación 3.3 representa matemáticamente la acción proporcional derivativa. Como acción derivativa pura no se utiliza, ya que se que mete demasiado ruido. El control PD se anticipa al control P en un tiempo igual a Td.

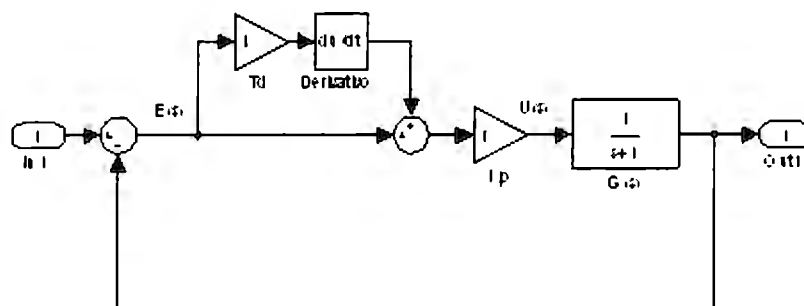


Figura 3.5 Acción derivativa

$$U(s) = K_p (1 + T_d s) \cdot E(s) \tag{3.3}$$

La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso vía un elemento de control como la posición de una válvula de control o la energía suministrada a un calentador, por ejemplo. Ajustando estas tres constantes en el algoritmo de control del PID, el controlador puede proveer un control diseñado para lo que requiera el proceso a realizar. La respuesta del controlador puede ser descrita en términos de respuesta del control ante un error, el grado el cual el controlador llega al "set point", y el grado de oscilación del sistema. La Figura 3.6 muestra la configuración completa. La Ecuación 3.4 es la señal del control PID en formato ISA.

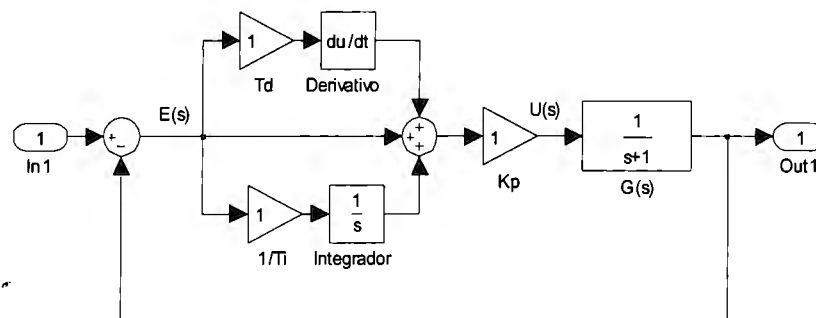


Figura 3.6 Control PID en configuración ISA

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) E(s) \quad (3.4)$$

Nótese que el uso del PID para control no garantiza control óptimo del sistema o la estabilidad del mismo. Algunas aplicaciones pueden sólo requerir de uno o dos modos de los que provee este sistema de control. Un controlador PID puede ser llamado también PI, PD, P o I en la ausencia de las acciones de control respectivas. Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y la ausencia del proceso integral puede evitar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control (Johnson, 2005).

3.3 Reglas de sintonización de Ziegler-Nichols

J.G. Ziegler y N.B. Nichols ingenieros de Taylor publicaron en 1942, una serie de criterios para la sintonía de controladores de tres términos ó controladores PID. Ziegler y Nichols desarrollaron sus criterios a través de la experimentación práctica de controladores neumáticos y diferentes procesos, por lo cual la técnica de Ziegler y Nichols es considerada heurística.

La principal ventaja de este desarrollo es que no se requiere del modelo del proceso para la sintonía, ya que las ganancias se deciden a partir de la respuesta temporal de un

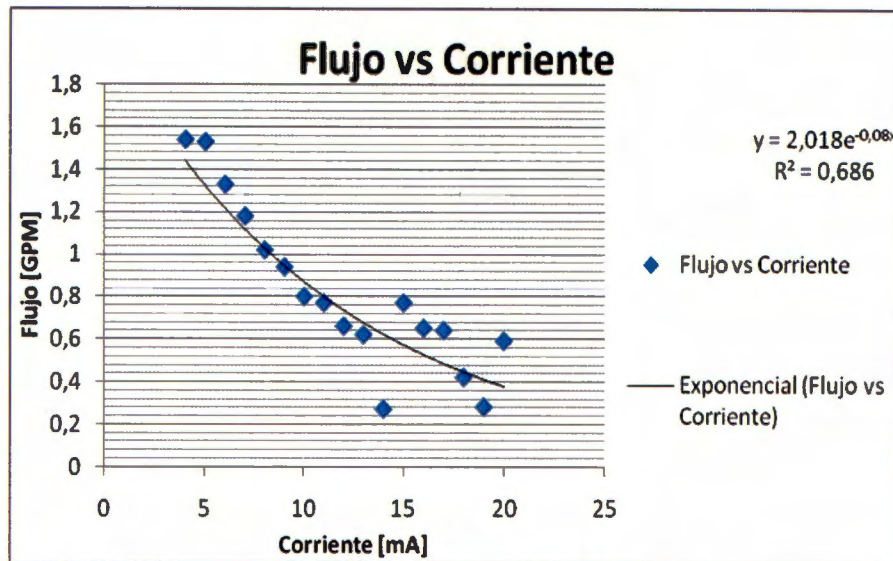


Figura 4.4 Gráfica de relación de flujo vs corriente de la válvula neumática

4.3 Sensor de nivel ultrasónico

El sensor se colocó a 8.5 cm sobre el borde superior del tanque de proceso. Una vez hecho esto, la medición que se pudo obtener fue la que se muestra en la gráfica de la Figura 4.5. Es importante hacer notar que esta caracterización se hizo midiendo el voltaje de salida directamente en el VI de LabVIEW por medio de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB-6211.

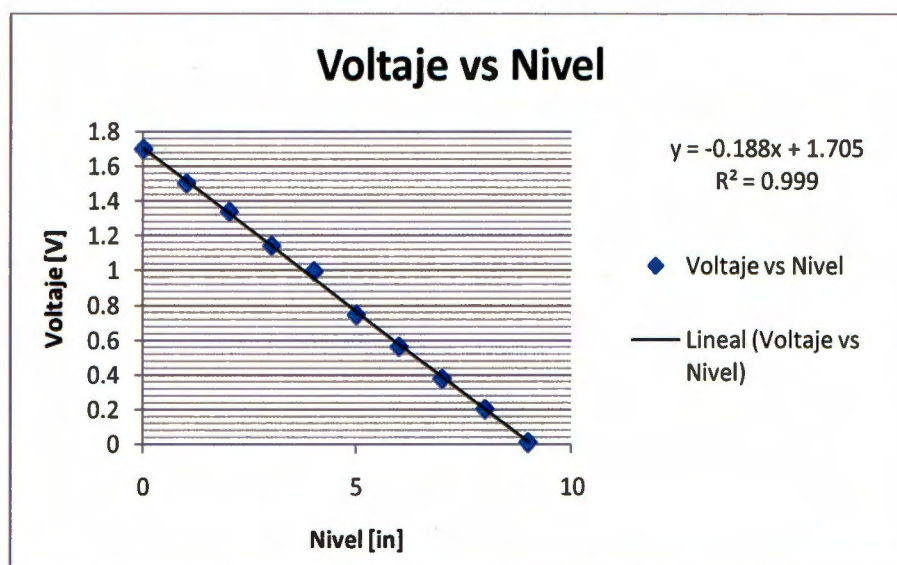


Figura 4.5 Gráfica de relación de voltaje vs nivel del sensor ultrasónico

3.3.2 Lazo Cerrado

El método original propuesto por Ziegler y Nichols consiste, como lo muestra la Figura 3.8 en contar con un lazo cerrado de control proporcional para una planta dada, e incrementar gradualmente la ganancia hasta lograr una oscilación sostenida en la salida K_u , de la cual es medida su amplitud y frecuencia, utilizadas a su vez para calcular las ganancias del controlador PID. El periodo T_u (Figura 3.9) y la ganancia crítica K_u son determinadas experimentalmente. Los cálculos de los valores K_p , T_i y T_d sugeridos por los autores de esta sintonización son los que se muestran en la Tabla 3.3.

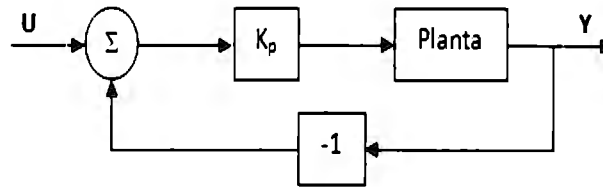


Figura 3.8 Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional

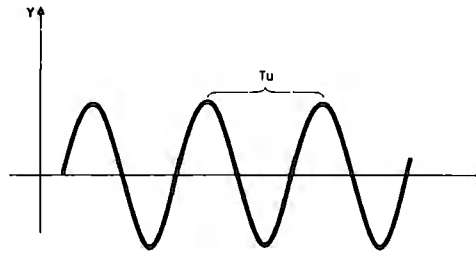


Figura 3.9 Salida oscilatoria del sistema

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$.5K_u$	∞	0
PI	$.45 K_u$	$.8 T_u$	0
PID	$.6 K_u$	$.5 T_u$	$.12 T_u$

Tabla 3.3 Reglas de sintonización de Ziegler-Nichols en lazo cerrado

3.4 Sintonización de controladores PID para procesos Integrales

En marzo de 2001 el ingeniero Italiano A. Visioli publicó el artículo en el que describe el método para la sintonización de procesos integrales e inestables. Los controladores PID son indudablemente los controladores más adoptados para su aplicación en plantas industriales, principalmente porque, a pesar de su simplicidad, pueden asegurar un desempeño satisfactorio para una amplia gama de procesos. Para simplificar el trabajo de

los operadores, muchas fórmulas de sintonización han sido desarrolladas en los últimos 60 años, como es el caso de la bien conocida fórmula de sintonización Ziegler – Nichols.

Los procesos integrales están generalmente relacionados con problemas de control de nivel de procesos industriales. Considerando la siguiente función de transferencia, Ecuación 3.6, de un sistema integrador:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-L \cdot s}}{s} \quad (3.6)$$

El objetivo de Visioli fue encontrar las fórmulas de sintonización que relacionen los coeficientes PID a los parámetros K y L del proceso para minimizar el criterio de desempeño de la integral tal como la integral del error al cuadrado (ISE). Para ese propósito Visioli utilizó algoritmos genéticos, los cuales son conocidos por proporcionar optimización general para problemas estocásticos (al azar).

Tras su investigación Antonio Visioli propone las siguientes reglas de sintonización, Tabla 3.4, para la respuesta óptima al cambio en el punto de ajuste de procesos integrales:

	Kp	Ti	Td
PD	$\frac{1.03}{K \cdot L}$	---	$0.49 \cdot L$

Tabla 3.4 Reglas de Sintonización de A. Visioli

3.5 PLC Simatic S7-300

Los PLC (*Controladores Lógicos Programables*) consisten en módulos de entradas y de salidas, una CPU y normalmente una fuente de poder. Las entradas aceptan señales analógicas o digitales y las convierten en una señal lógica que usa la CPU. La CPU toma las decisiones y ejecuta las instrucciones de control basadas en las instrucciones del programa de la memoria. Los módulos de salida convierten las instrucciones de control de la CPU en señales digitales o analógicas, las cuales pueden usarse para controlar actuadores. Para este proyecto el software de programación para introducir las instrucciones deseadas al PLC es el STEP 7.

La empresa alemana SIEMENS tiene entre su amplia gama de PLC a la familia de SimaticS7-300, aunque la vida del producto fue muy corto (15-11-2001/1-03-2004), su desempeño, en la industria, fue y sigue siendo de alto rendimiento.

Los lenguajes de programación, para toda la familia de autómatas Simatic S7, son AWL y KOP. Internamente el autómata sólo trabaja con lista de instrucciones (AWL), KOP es

traducido a AWL por el software de STEP7. Las instrucciones son las órdenes lógicas elementales que el sistema debe obedecer. El lenguaje de AWL está conformado por operación (instrucción) y operando (variable o dirección con la que trabaja la operación).

3.5.1 Datos

La mínima unidad de almacenamiento es un bit, 8 bits conforman un byte. El bit menos significativo es el que se encuentra a la derecha, mientras que el más significativo es el de la izquierda, como lo muestra la Figura 3.10.



Figura 3.10 Almacenamiento de datos

Existen 3 formatos de representación numérica: Binario, Hexadecimal y BCD. En el caso de este último existen dos formatos, el de 3 cifras y el de 7. También existen 3 formatos de números: Entero, doble entero y real. Es necesario que el usuario sepa saber el tipo de dato y formato, para que de este modo, no existan problemas de compilación en el sistema. En el Anexo, está un apartado el cual contiene una tabla con la declaración de cada uno de los formatos.

Para direccionar según el tipo de dato, la letra que los denota es: B para un byte (8 bits), W para una palabra (16 bits) y D para una palabra doble (32 bits). El rango de la memoria depende del tipo de dato, ya que un bit ocupa menos espacio que un byte y así sucesivamente, la Tabla 3.5. Lo explica.

Tipo de dato	Rango
bit	M0.0 a M255.7
byte	MB0 a MB255
palabra	MW0 a MW254
doble palabra	MD0 a MD252

Tabla 3.5 Direccionamiento de datos

Existen dos idiomas con los cuales se puede trabajar en el STEP7: inglés y alemán. Algunas declaraciones de las instrucciones son diferentes. Hay que saber ambos, ya que muchos manuales trabajan en alemán y el usuario americano normalmente utiliza el idioma inglés. En la parte de Anexos se encuentra una tabla con los comandos básicos en los dos idiomas.

Los acumuladores son elementos básicos en la programación del STEP 7 y para este proyecto. El uso de ellos se explica en la parte de Anexos. Otra parte importante para el

entendimiento del usuario son los tipos de módulos, ya que para el uso de los reguladores PID están relacionados varios módulos.

3.5.2 Tipos de Módulos

En el Simatic S7 existen varios tipos de módulos que dividen la memoria de programa y la de datos en secciones, de esta manera, existe una programación estructurada y un acceso ordenado a los datos. Estos contienen partes del programa, por lo que también son denominados bloques lógicos. El número permitido de bloques de cada tipo y su longitud permitida dependen de la CPU. Se enuncian algunos de los posibles módulos.

Módulos de Organización (OB)

Es el enlace de comunicación entre el sistema operativo de la CPU y el programa del usuario. Hay 3 tipos de OB: OB1 o de ciclo libre, OB de error y alarma y OB de arranque. Los OBs definen la estructura del programa de usuario.

Módulos de funciones (FB)

Estos módulos son para programa especiales (de gran complejidad o con mucha frecuencia). Este tipo de bloques son programables. Debido a su estructura posee una zona de memoria asignada para guardar variables en una DB (módulo de datos de instancia). Los parámetros que se transfieren al FB, así como las variables estáticas, se memorizan en el DB de instancia. Las variables temporales se memorizan en la pila de datos locales, las cuales se perderán al concluir el FB. Los datos memorizados en el DB de instancia no se pierden al concluir el tratamiento del FB. La Figura 3.11 explica el orden de los módulos cuando son instanciados.

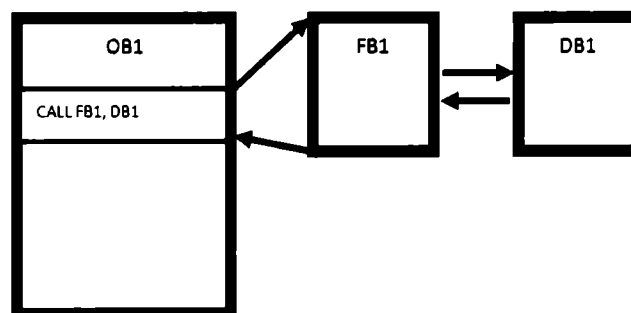


Figura 3.11 Orden de módulos al ser llamados

Para llamar a un FB la instrucciones "CALL FBn, DBn" la cual llama al FB independientemente del RLO. Hay que asignarle un bloque de datos de instancia. Una vez procesado el FB invocado, el programa del bloque invocante seguirá siendo procesado.

Módulos de datos (DB)

Estos módulos contienen datos del programa del usuario. En él se encuentran módulos de datos globales y de instancia. En un DB no existen instrucciones. Se puede observar en la Figura 3.11 como se llama después de un FB.

- *Módulos de datos de instancia* - Se asignan a un determinado modulo de función (FB) y sólo se pueden manejar desde ese módulo. Pueden asignarse varios módulos de datos de instancia a un módulo de función (FB).
- *Módulos de datos globales* - Sus datos pueden ser accedidos por todos los bloques (OB, FC y FB) del programa. Los datos pueden ser modificados y su valor se conserva aún saliendo del módulo.

En la parte de Anexos, hay un apartado el cual explica la declaración para acceder a datos de un DB.

3.5.3 Módulo de entradas y salidas analógico

El módulo analógico del CPU 314C-2DP cuenta con 5 entradas y 2 salidas analógicas. La Figura 3.12 muestra los canales y sus salidas de voltaje o corriente correspondientes. La pata 20 (M_{ana}) es la tierra del módulo. Las terminales cuatro, siete, diez y trece son las comunes.

1			Ø21
2 Ø		DI+2.0	Ø22
3 Ø	PEWx+0	DI+2.1	Ø23
4 Ø		DI+2.2	Ø24
5 Ø		DI+2.3	Ø25
6 Ø	PEWx+2	DI+2.4	Ø26
7 Ø		DI+2.5	Ø27
8 Ø		DI+2.6	Ø28
9 Ø	PEWx+4	DI+2.7	Ø29
10 Ø		4M	Ø30
11 Ø			Ø31
12 Ø	PEWx+6		Ø32
13 Ø			Ø33
14 Ø	PEWx+8		Ø34
15 Ø			Ø35
16 Ø	PAWx+0		Ø36
17 Ø			Ø37
18 Ø	PAWx+2		Ø38
19 Ø			Ø39
20 Ø	M _{ANA}		Ø40

Entrada analógicas o de la periferia:

- Canal cero terminales 2 (Voltaje) y 3(Corriente)
- Canal uno terminales 5 (Voltaje) y 6 (Corriente)
- Canal dos terminales 8 (Voltaje) y 9 (Corriente)
- Canal tres terminales 11 (Voltaje) y 12 (Corriente)
- Canal 4 de potencia terminales 14 y 15

Salidas analógicas o de la periferia:

- Canal cero terminales 16 (Voltaje) y 17(Corriente)
- Canal uno terminales 18 (Voltaje) y 19 (Corriente)

Figura 3.12 CPU314C-2DP y sus salidas analógicas

Las siguientes Tabla 3.6 Y Tabla 3.7 muestran la declaración de entradas y salidas de la periferia. La dirección de un canal de entrada o salida analógico es siempre una dirección de palabra. La dirección de canal depende siempre de la dirección inicial del módulo.

Entradas			
Tipo de dato	Declaración en Inglés	Declaración en Alemán	Rango
Byte	PIB	PEB	0 a 65635
Palabra	PIW	PEW	0 a 65534
Palabra doble	PID	PED	0 a 65532

Tabla 3.6 Entradas analógicas

Salidas			
Tipo de dato	Declaración en Inglés	Declaración en Alemán	Rango
Byte	PQW	PAB	0 a 65535
Palabra	PQW	PAW	0 a 65534
Palabra doble	PQD	PAD	0 a 65532

Tabla 3.7 Salidas analógicas

Para declarar las entradas y salidas analógicas del CPU 314C- 2DP es necesario entrar al HW Config y dar doble click sobre AI5/AO2, de este modo aparece la pantalla de propiedades de los 5 puertos de entrada y los dos puertos de salida que contiene el módulo.

En el caso de la pestaña de Entradas existen cinco entradas y estas pueden ser modificadas a la unidad de temperatura que se requiera: Grados Centígrados, Fahrenheit o Kelvin, como lo muestra la Figura 3.13. Todas las salidas son puestas a la misma unidad. El tipo de entrada en el canal cero, uno, dos y tres pueden ser de Voltaje (V) y Corriente (I). La entrada del canal cuatro puede ser por resistencia (conexión a dos hilos) o como termoresistencia.

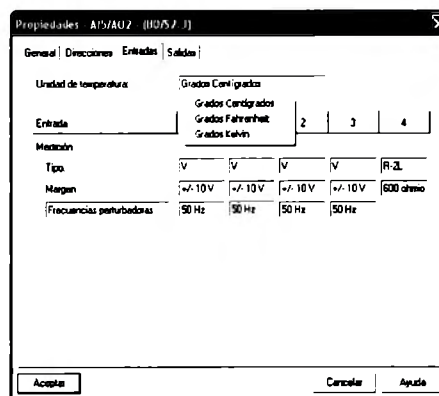


Figura 3.13 Propiedades pestaña de Entradas

Para el caso de la pestaña de Salidas, sólo existen dos canales, los cuales pueden tener una salida de corriente o de voltaje. Si es corriente, las opciones son de $\pm 20\text{mA}$, 0 a 20mA y 4 a 20mA, esto lo muestra la Figura 3.14.

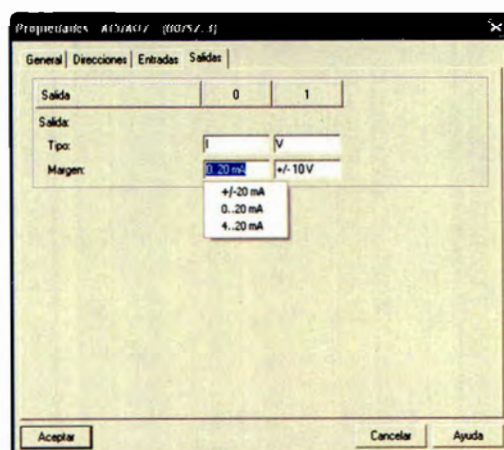


Figura 3.14 Propiedades pestaña de Salidas

Capítulo 4 Caracterización del sistema

En esta sección se muestra la caracterización de los diferentes sensores y actuadores del sistema lo que sirvió para poder identificar las dinámicas de los diferentes lazos a controlar y para posteriormente poder realizar el escalamiento necesario para implementar el sistema de control.

4.1 Convertidor I/P (IYT100)

Siguiendo las indicaciones del manual de operación la calibración del convertidor se realiza por medio de un multímetro conectando el convertidor en serie con el controlador PID no disponible en nuestro sistema, por lo que no se pudo realizar la calibración de esta manera. En lugar del controlador PID, se suministró al convertidor de corriente a voltaje una corriente de 4 a 20 mA por medio de un amplificador operacional en su configuración de convertidor de voltaje a corriente y que se muestra en la Figura 4.1, ya con ello se pudo caracterizar la operación de la válvula. El convertidor I/P tiene una respuesta totalmente lineal siendo 4 mA correspondientes a 3 psi y 20 mA a 15 psi. La relación entre presión y corriente se muestra en la gráfica de la Figura 4.2.

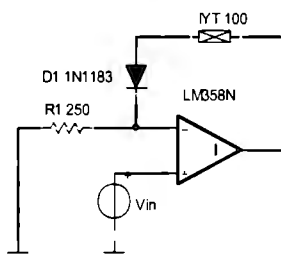


Figura 4.1 Convertidor de voltaje a corriente

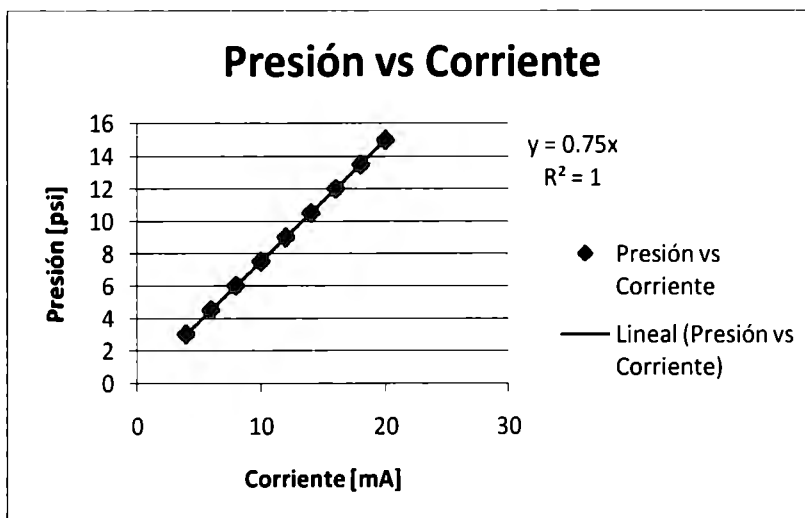


Figura 4.2 Gráfica de relación presión vs corriente del convertidor P/I

4.2 Válvula neumática de diafragma (FCV100)

Ante la relación lineal del convertidor, se procedió a caracterizar la válvula aplicándole una corriente de 4 a 20 mA de la misma manera que se suministró la corriente en el convertidor I/P, y midiendo el flujo que permitía pasar por medio del transductor y transmisor de flujo, FE 100 y FIT 100 respectivamente. Esta relación se muestra en la gráfica de la Figura 4.3.

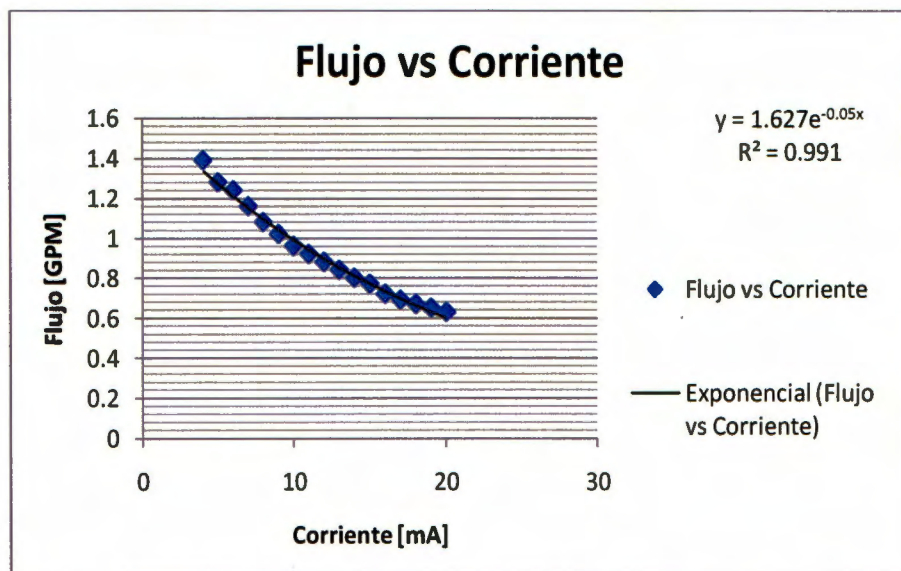


Figura 4.3 Gráfica de relación de flujo vs corriente de la válvula neumática

Con la calibración que se encontró por default daba como resultado que la válvula no cerraba en su totalidad, por lo que se ajustó el resorte que modifica el cierre de la válvula, pero el resultado fue contraproducente como se puede apreciar en la gráfica de la Figura 4.4. Por lo que se decidió regresarla su posición inicial.

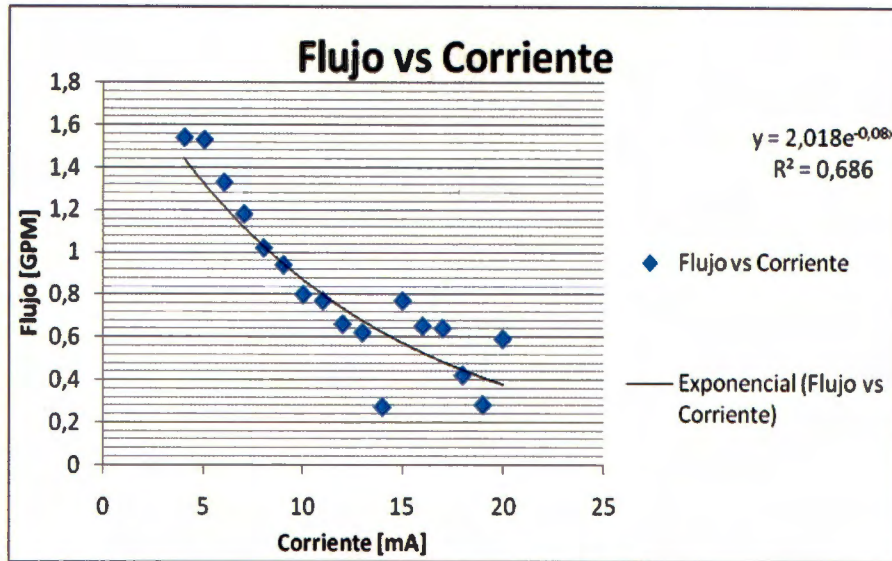


Figura 4.4 Gráfica de relación de flujo vs corriente de la válvula neumática

4.3 Sensor de nivel ultrasónico

El sensor se colocó a 8.5 cm sobre el borde superior del tanque de proceso. Una vez hecho esto, la medición que se pudo obtener fue la que se muestra en la gráfica de la Figura 4.5. Es importante hacer notar que esta caracterización se hizo midiendo el voltaje de salida directamente en el VI de LabVIEW por medio de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB-6211.

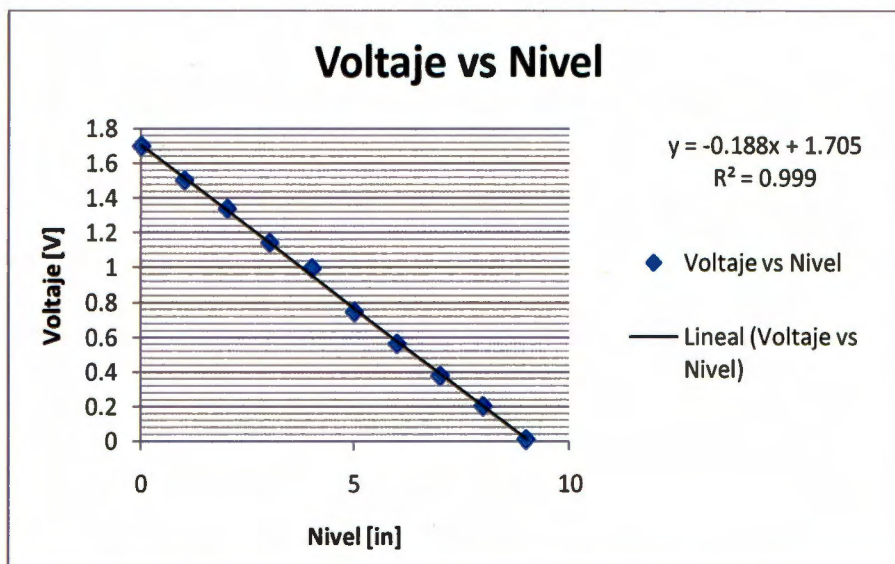


Figura 4.5 Gráfica de relación de voltaje vs nivel del sensor ultrasónico

4.4 Transmisor de flujo (FIT100)

Este transmisor además mostrar en un display el flujo medido por el transductor FI 100, calculado a partir de una configuración dada, genera una corriente que varía entre 4 y 20 mA. Esta corriente fue medida directamente a través de la DAQ NI USB-6211 y su valor mostrado en el VI de LabVIEW que fue programado para este objetivo. La relación de corriente entregada por unidad de flujo se muestra en la gráfica la Figura 4.6.

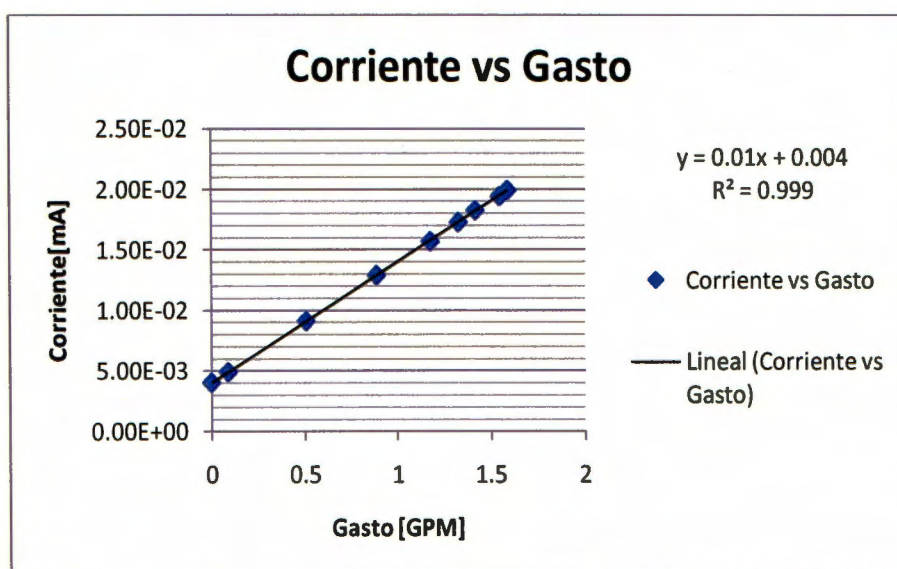


Figura 4.6 Gráfica de relación de corriente vs gasto del transmisor de flujo

4.5 Sensor de nivel capacitivo

Este sensor entrega una corriente de 4 a 20 mA proporcional al nivel de agua presente en el tanque. La gráfica del voltaje leído a través de un multímetro digital se muestra en la gráfica de la Figura 4.7.

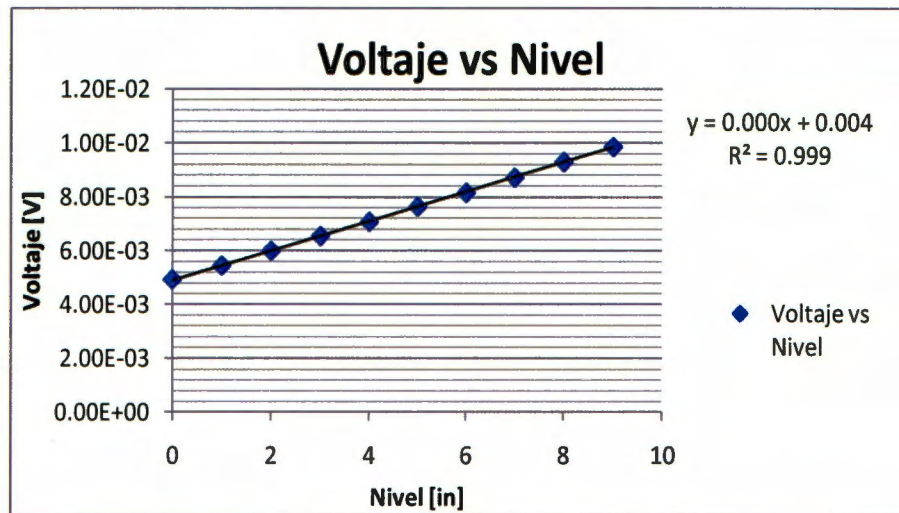


Figura 4.7 Gráfica de relación de voltaje vs corriente del sensor de nivel capacitivo

4.6 Módulo analógico del PLC Simatic S7-300

Una entrada analógica es una señal de entrada que tiene una señal continua. Las entradas y salidas analógicas típicas varían de 0 a 20 mA o de 4 a 20 mA, y de 0 a 10 V o de ± 10 V. Las entradas analógicas se leen directamente de la periferia y las salidas analógicas se escriben directamente en la periferia. De manera experimental, se obtuvo la caracterización de las señales de voltaje y de corriente.

A cada número decimal, cargado en el CPU, le corresponde un determinado voltaje de salida en el canal cero o uno de la periferia. Para obtener esta caracterización se cableó la tierra del módulo analógico, pata 20 (M_{ana}), a la tierra del CPU; el multímetro se colocó de manera que una terminal fuera a la terminal del canal 0 de voltaje (pata 16) y la otra a la tierra común. Por medio del STEP7, se carga un número decimal al acumulador y se transfiere a la salida analógica del canal cero o uno. En la Figura 4.8 se muestra la caracterización del voltaje resultante. La gráfica muestra que se obtuvieron valores máximos de 11.75 Volts y mínimos de -11.81 Volts. Para obtener estos valores, en las *Propiedades* del canal analógico deben estar en ± 10 Volts. La tabla de valores para la caracterización del voltaje y corriente se encuentra en la sección de anexos.

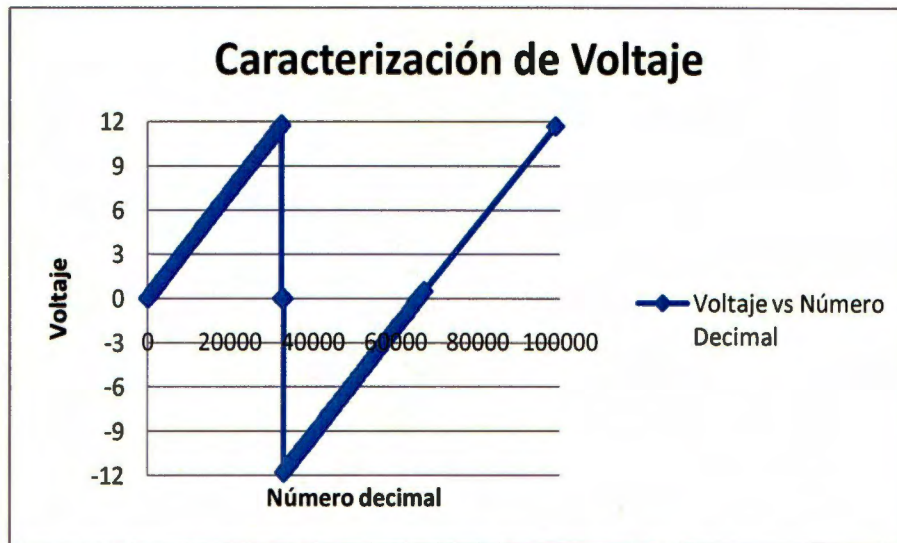


Figura 4.8 Gráfica de caracterización de voltaje

La gráfica en la Figura 4.9 es la caracterización de la corriente. Para este caso, en la parte de *Propiedades*, se puso la salida del canal con la configuración de Corriente. En la terminal 17 se colocó una resistencia de 100 ohms para medir la corriente en serie por medio del multímetro. En la opción de 4 a 20 mA los resultados fueron satisfactorios como se muestra la Figura 4.9.

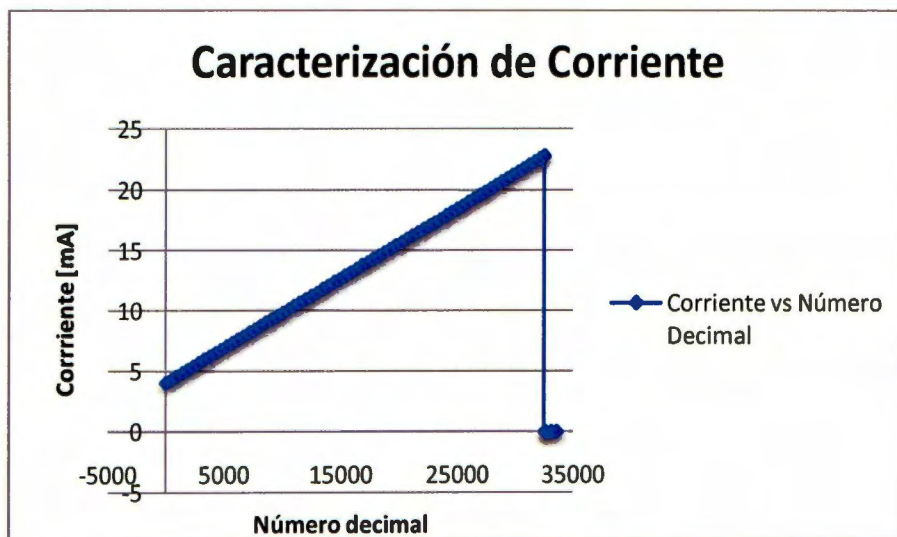


Figura 4.9 Gráfica de caracterización de corriente

Capítulo 5 Identificación del Sistema

La puesta en servicio de un sistema de control industrial requiere de la correcta sintonización del controlador, es decir de la selección adecuada de sus parámetros. Para poder sintonizar el controlador $C(s)$ de un lazo de control, es necesario identificar primero la dinámica del proceso que se va a controlar $G(s)$, para luego obtener los parámetros del controlador, empleando el método de sintonización seleccionado. El proceso de sintonización del controlador consta así de dos etapas: identificación y sintonización.

Para identificar la dinámica del sistema con el que se está trabajando es necesario modelarlo matemáticamente. Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión. La dinámica de muchos sistemas, ya sean mecánicos, eléctricos, térmicos, económicos, biológicos, etc., se describe en términos de ecuaciones diferenciales. Dichas ecuaciones diferenciales se obtienen a partir de leyes físicas que gobiernan un sistema determinado, como las leyes de Newton para sistemas mecánicos y las leyes de Kirchhoff para sistemas eléctricos.

En la teoría de control, a menudo se usan las funciones de transferencia para caracterizar las relaciones de entrada-salida de componentes o de sistemas. La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante con el tiempo se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación) bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero. (Ogata 1998)

Para encontrar la función de transferencia de un sistema dadas las condiciones de operación elegidas sin conocer la operación interna de dicho sistema se pueden utilizar varios métodos experimentales. La obtención de la información dinámica del proceso requiere que éste sea excitado de alguna forma y que tanto la entrada aplicada así como la respuesta del proceso, sean registradas. Por estas razones resulta necesario realizar una prueba experimental que permita identificar un modelo dinámico para el proceso.

5.1 Lazo de Flujo

El método de Ziegler y Nichols y la variación propuesta por Miller requieren que se trace una recta tangente a la curva de reacción del sistema en el punto de inflexión. Esto no siempre es fácil de realizar, sobre todo si la respuesta del sistema presenta ruido. Una

variación en la pendiente de la recta tangente afecta tanto el valor del tiempo muerto como el de la constante de tiempo del modelo.

Para identificar dos parámetros que requiere el modelo, la constante de tiempo y el tiempo muerto aparente del sistema, se pueden establecer dos ecuaciones con dos incógnitas utilizando dos puntos sobre la curva de reacción. De este modo se garantiza que la respuesta del modelo coincida con la del sistema real en estos dos puntos como mínimo. (Alfaro 2001)

El primer método basado en dos puntos sobre la curva de reacción fue propuesto por Smith. Los instantes seleccionados por este autor fueron los tiempos requeridos para que la respuesta alcance el 28.3% y el 63.2% del valor final, y corresponden a las ecuaciones 5.1 a 5.4

$$y(t_1) = y_0 + 0.283(\Delta y) \quad (5.1)$$

$$y(t_2) = y_0 + 0.632(\Delta y) \quad (5.2)$$

$$T = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad (5.3)$$

$$\tau = t_2 - T \quad (5.4)$$

Una vez que son encontrados estos parámetros se puede aproximar la dinámica del proceso al modelo propuesto por Ziegler y Nichols en donde:

$$G(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T \cdot s + 1} \quad (5.5)$$

En donde k es la ganancia del sistema:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (5.6)$$

En donde Δy es el cambio en la respuesta y Δu es el cambio en la excitación.

Para llevar a cabo la identificación del lazo de flujo del sistema, se procedió a medir en un osciloscopio una variación en la entrada del sistema de -13 mA en el convertidor I/P y la reacción a este escalón dado, que fue medida en el sensor de flujo. Obteniendo la curva de reacción, Figura 5.1.

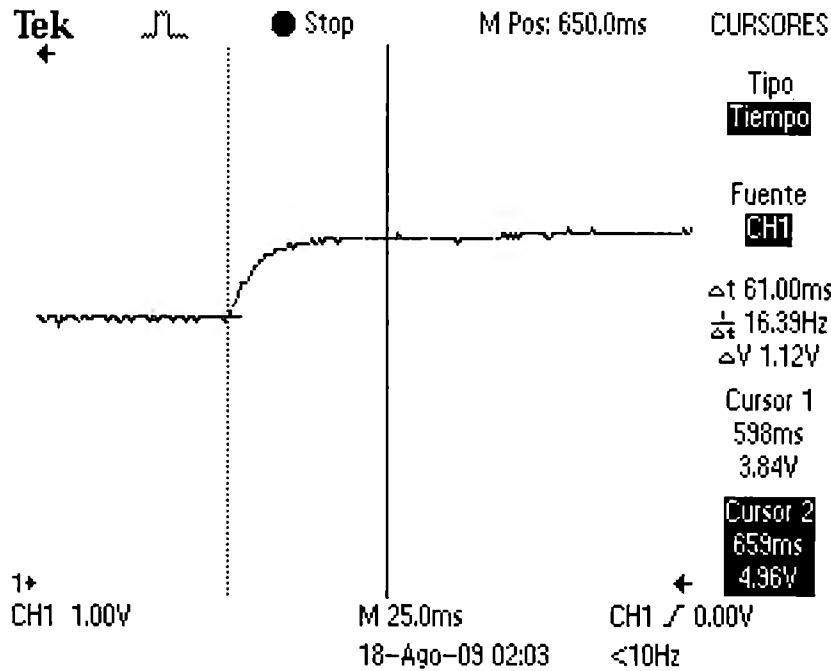


Figura 5.1 Curva de reacción del lazo de flujo

Por el método de Smith se obtuvo la función de transferencia, Ecuación 5.7.

$$G(s) = \frac{0.086 \cdot e^{-0.001 \cdot s}}{0.009 \cdot s + 1} \quad (5.7)$$

Como las dinámicas de flujo son muy rápidas y el tiempo muerto es aproximadamente cero, la función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{0.086}{0.009 \cdot s + 1} \quad (5.8)$$

Para verificar que esta función de transferencia se adecúa a la dinámica observada por medio del osciloscopio, se simuló la respuesta al escalón unitario de la función de transferencia en lazo abierto en Simulink de Matlab como se muestra en la Figura 5.2 obteniendo la gráfica de la Figura 5.3.

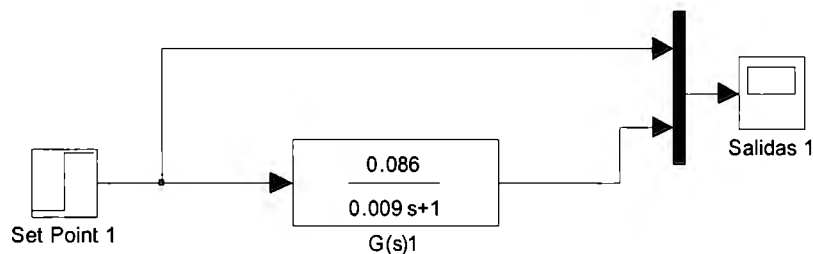


Figura 5.2 Lazo abierto de flujo, Simulink

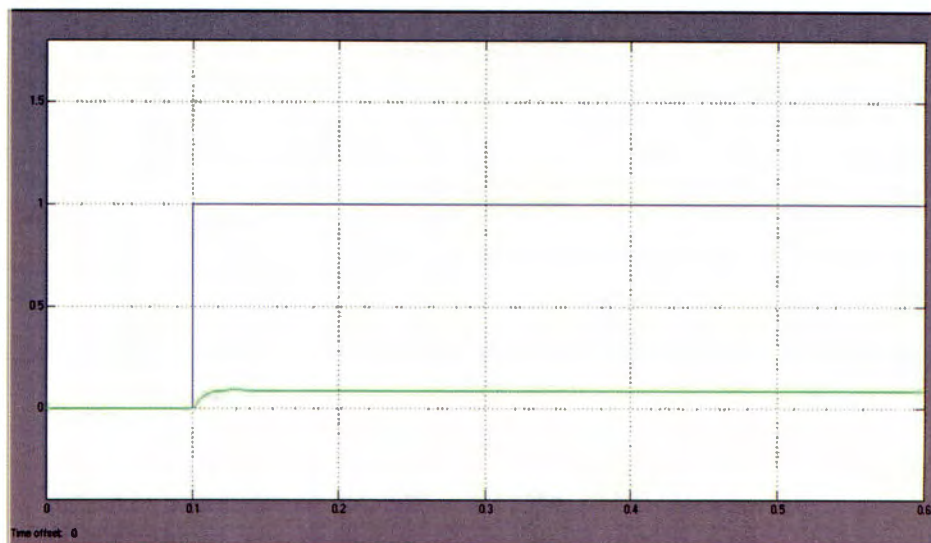


Figura 5.3 Gráfica de lazo abierto de flujo, Simulink

Comúnmente para este tipo de sistemas se aplicarían las reglas de Ziegler y Nichols para la sintonización del controlador PID $C(s)$, Pero estas reglas tienen una restricción y ésta es que

$$0.1 < \frac{\tau}{T} < 0.6 \tag{5.9}$$

Al no cumplirse esta condición se tiene que seguir el consejo de Expertune que por un método heurístico propusieron un rango de valores para la sintonización de los diferentes lazos de control como se muestra en la Tabla 5.1. Expertune es una compañía que, como ellos mismos se definen, diseña software industrial que maximiza la productividad y eficiencia y reduce los residuos en las industrias de proceso en todo el mundo: químicos, pulpa y papel, utilities, refinería y procesamiento de alimentos. (Expertune 2008)

Lazo	Ganancia	Integral rep/min	Derivativo min
Flujo	0.2 a 2	20 a 200	No
Presión de líquido	0.2 a 2	20 a 200	No
Presión de gas	2 a 100	0.02 a 10	0.02 a 0.1
Nivel de líquido	2 a 100	0.1 a 1	0.01 a 0.05
Temperatura	1 a 50	0.02 a 5	0.1 a 20
Cromatografía	0.05 a 1	0.008 a 0.1	0.1 a 20

Tabla 5.1 Sintonización de diferentes lazos, Expertune

Una vez elegidos los valores máximos sugeridos de K_p y T_d se utilizaron para simular la respuesta del sistema dado en lazo cerrado por medio de Simulink de Matlab como se muestra en la Figura 5.4. Obteniendo la gráfica de la Figura 5.5.

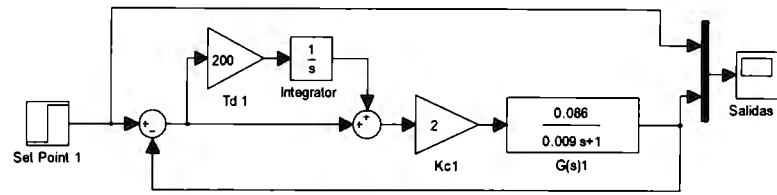


Figura 5.4 Lazo cerrado de control de flujo

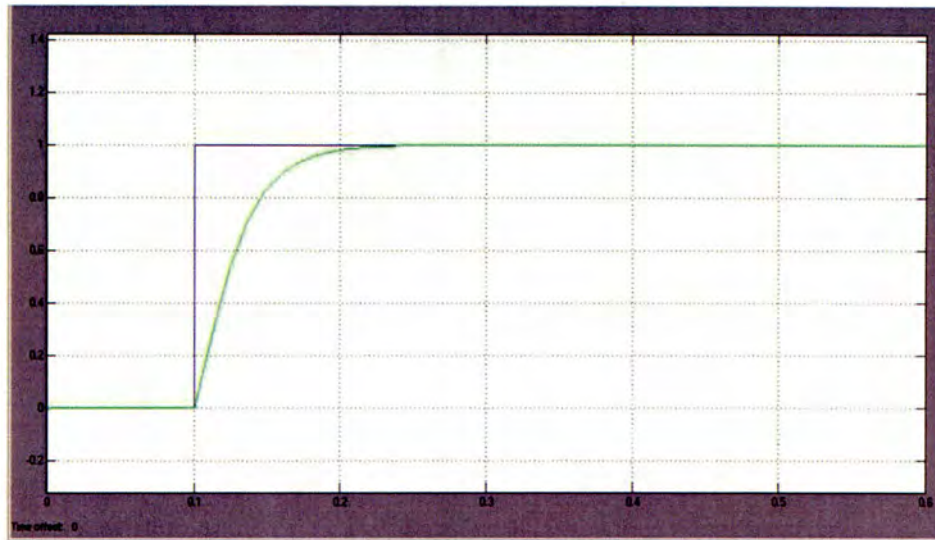


Figura 5.5 Gráfica de lazo cerrado de control de flujo

Como se puede apreciar en un análisis del lugar geométrico de las raíces del sistema controlado en lazo cerrado, el sistema se encuentra totalmente estable a cualquier valor de ganancia K_p como se muestra en la Figura 5.6.

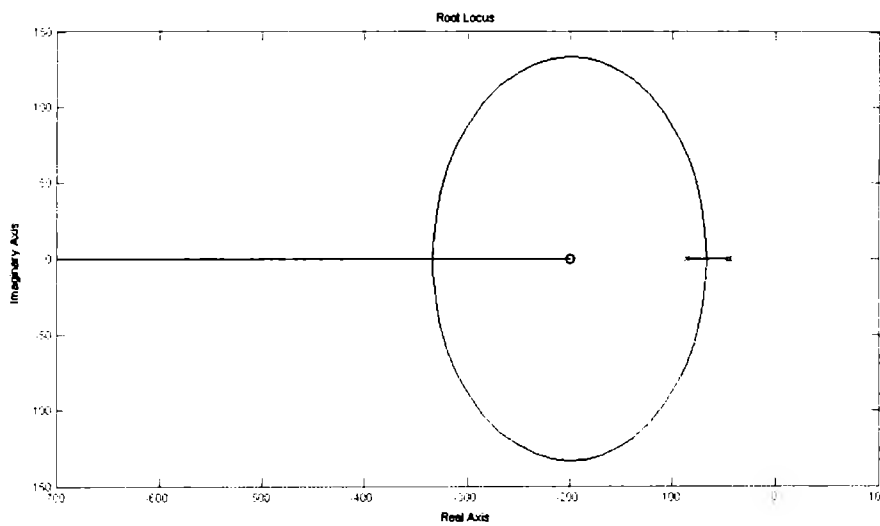


Figura 5.6 Lugar geométrico de las raíces del control de flujo

5.2 Lazo de nivel

Los procesos integrales están generalmente relacionados con problemas de control de nivel de procesos industriales. Considerando la siguiente función de transferencia de un sistema integrador:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-L \cdot s}}{s} \quad (5.10)$$

Se llevó a cabo la identificación de la dinámica del lazo de nivel del sistema. En un inicio se establecieron las condiciones de operación del sistema manteniendo las dos válvulas solenoides de drenado SV 100-B y SV 100-C abiertas. Hecho esto se procedió a medir en un osciloscopio una variación en la entrada del sistema. Para este caso al convertidor I/P fue alimentado con una señal de 11.21 mA para mantener un nivel de agua estable, una vez lograda la estabilidad se aplicó una variación en la corriente para obtener un escalón y así registrar la reacción a este escalón dado, que fue medida en el sensor ultrasónico de nivel obteniendo la siguiente curva de reacción observada en la Figura 5.7.

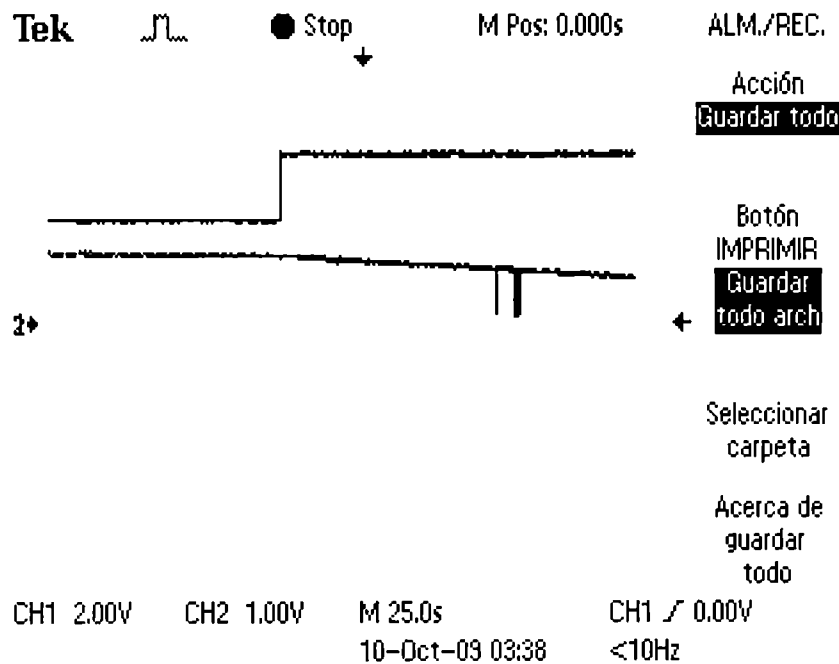


Figura 5.7 Curva de reacción de lazo de nivel

A partir de las mediciones tomadas de la curva se aproximó la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{0.002020 \cdot e^{-11 \cdot s}}{s} \quad (5.11)$$

La ganancia K se obtuvo a partir de la pendiente de la curva de reacción y el retardo L corresponde a la diferencia entre el tiempo de la aplicación del escalón y el tiempo de

reacción del sistema. Es muy importante puntualizar que el signo negativo de la función es cancelada al tomar en cuenta la acción inversa de la válvula proporcional FCV 100. Para verificar que esta función de transferencia se adecúa a la dinámica observada por medio del osciloscopio, se simuló nuevamente la respuesta al escalón unitario de la función de transferencia en lazo abierto en Simulink de Matlab como se muestra en la Figura 5.8 obteniendo la gráfica de la Figura 5.9.

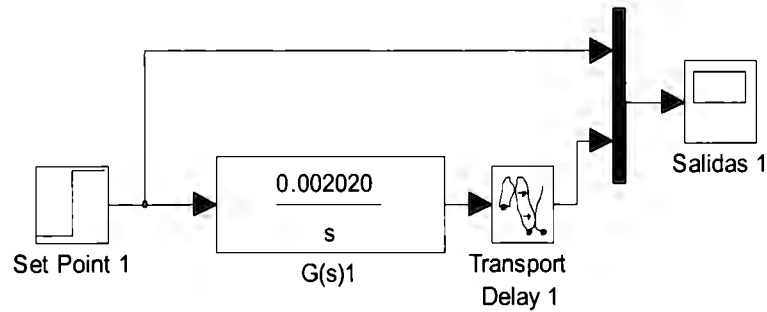


Figura 5.8 Lazo abierto de nivel, Simulink

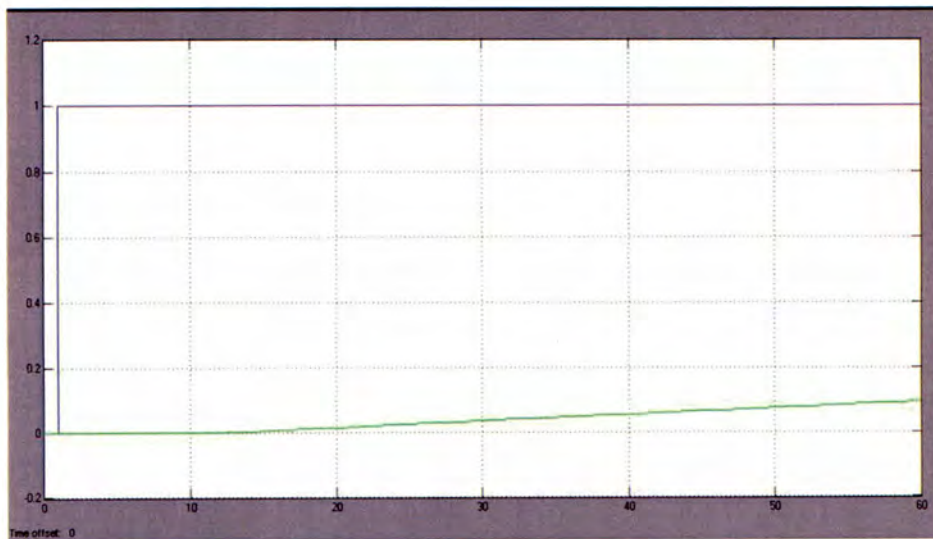


Figura 5.9 Gráfica de lazo abierto de nivel, Simulink

Una vez obtenidos los valores de la ganancia y del tiempo muerto se aplicaron las reglas de sintonización de Visioli para calcular la ganancia K_p y el tiempo T_d estas pueden consultarse en la Tabla 3.4, mismos que se utilizaron para simular la respuesta del sistema dado en lazo cerrado por medio de Simulink de Matlab como se muestra en la Figura 5.10. Obteniendo la gráfica de la Figura 5.11.

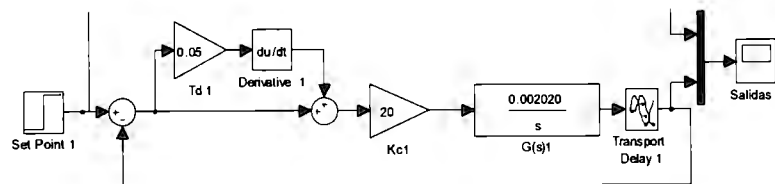


Figura 5.10 Lazo cerrado de control de nivel

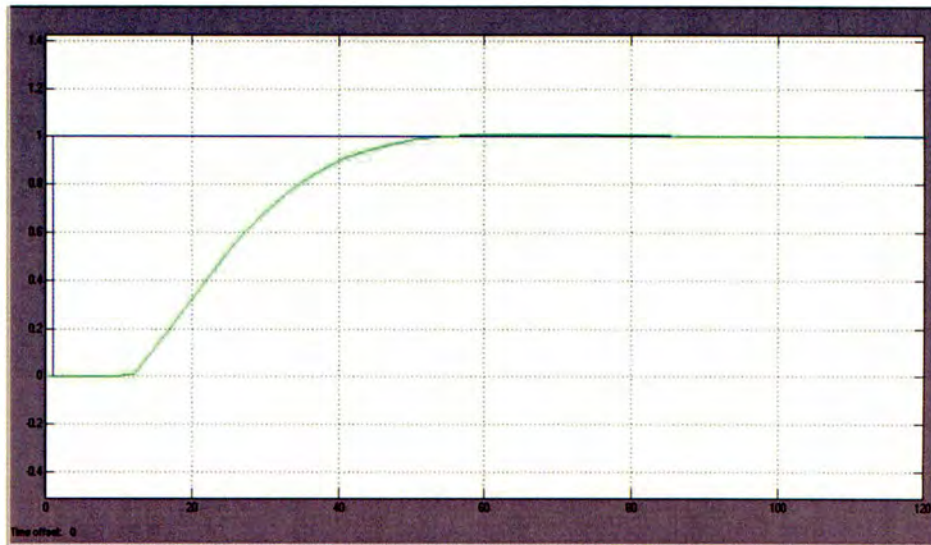


Figura 5.11 Gráfica de lazo cerrado de control de nivel

Al hacer el análisis del lugar geométrico de las raíces del sistema controlado en lazo cerrado pareciera que el sistema es inestable ya que los polos se encuentran muy cerca del origen, Figura 5.12. Pero el sistema es estable hasta un límite de ganancia K_p de 90 antes de que se vuelva inestable.

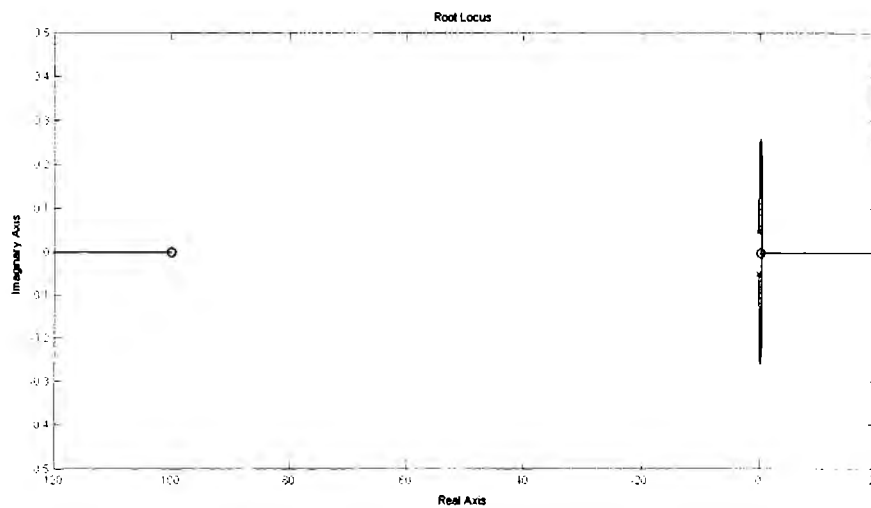


Figura 5.12 Lugar geométrico de las raíces del control de nivel

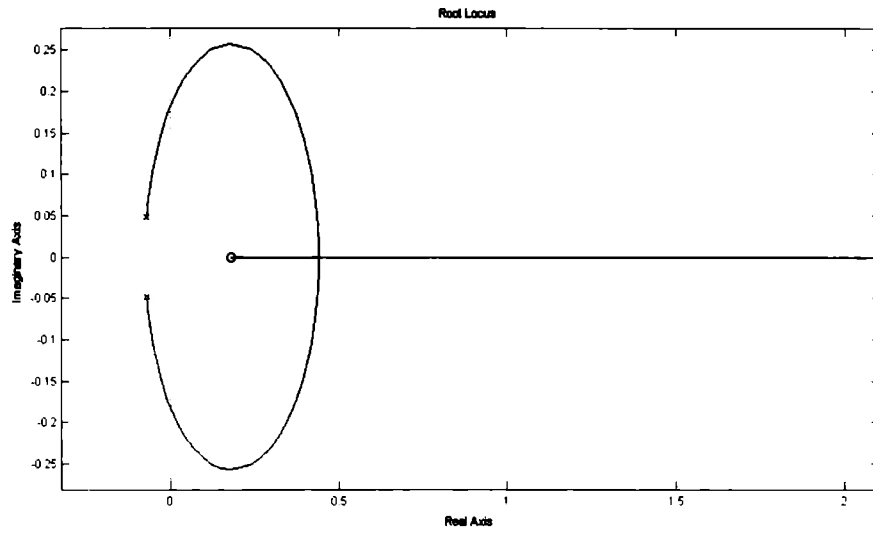


Figura 5.13 Acercamiento del lugar geométrico de las raíces del control de nivel

Capítulo 6 Sistema Propuesto

En este capítulo se habla de la implementación el Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552. Cronológicamente, la primer implementación que se realizó fue la del regulador PID por medio de LabVIEW, después el regulador PID por medio del PLC Simatic 300. Finalmente se implementó el control on/off por medio del los dos controladores anteriores con comunicación OPC.

6.1 Sistema de adquisición de datos

Para poder convertir las señales analógicas obtenidas por los sensores a señales que el LabVIEW pueda interpretar, es necesario capturar dichas señales por medio de una tarjeta de adquisición de datos. De la misma manera es necesario convertir la señal de control a una señal analógica, para después acondicionarla a una señal adecuada para el convertidor I/P. Sabiendo que se requerirían dos entradas y una salida analógicas se cableó y configuró la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6211 como se muestra a continuación.

6.1.1 Entrada analógica de voltaje (Sensor ultrasónico de nivel)

Dentro de un VI vacío se comenzó utilizando el asistente de configuración DAQ Assistant para la captura de la señal que genera el sensor ultrasónico como se muestra en la Figura 6.1.

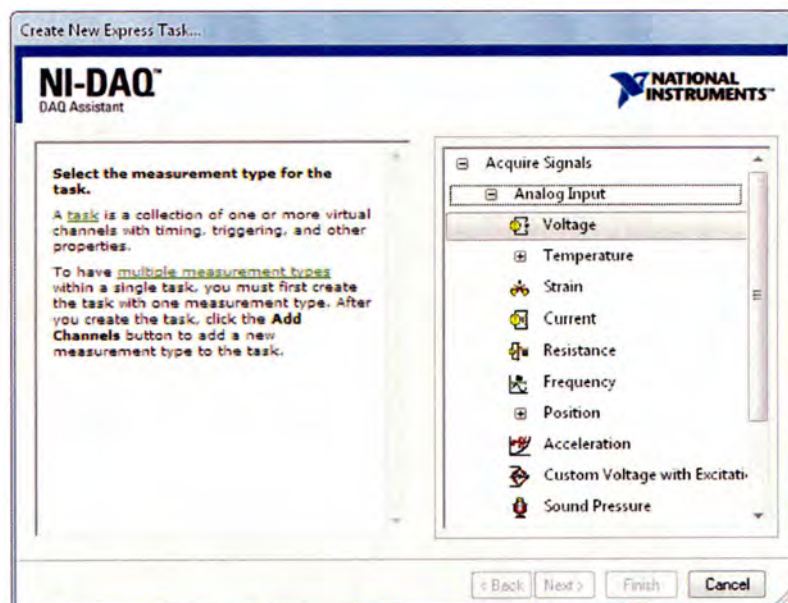


Figura 6.1 Asistente de configuración

Al seleccionar la opción Voltage el Asistente requiere que se seleccione el canal por el que se adquiere la señal de voltaje. El canal seleccionado fue ai0. Una vez hecho esto se abrió

una nueva ventana de configuración que se puede apreciar en la Figura 6.2; en ella se puede ajustar los límites inferiores y superiores de nuestra señal de entrada siendo 10 y -10 los límites establecidos por el fabricante. Uno de los aspectos más importantes a cuidar es la selección de la frecuencia de muestreo, ya que determina el tiempo de respuesta del sistema. Para la implementación del control se requirió tomar una muestra por cada ciclo de trabajo del VI por lo que se eligió 1 Sample (On Demand). La ejecución del ciclo de trabajo del VI es tan rápida que el tiempo de muestreo se minimiza, esto da como resultado que aunque el sistema está discretizando el proceso, se puede considerar como un sistema continuo. En esta misma ventana se puede revisar la conexión correcta de la señal para el canal seleccionado como en la Figura 6.3.

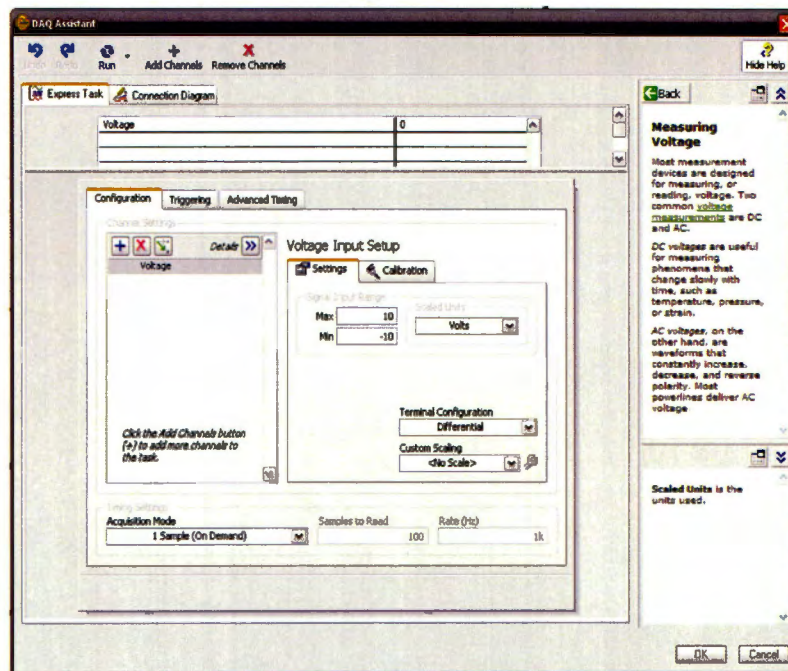


Figura 6.2 Ventana de configuración

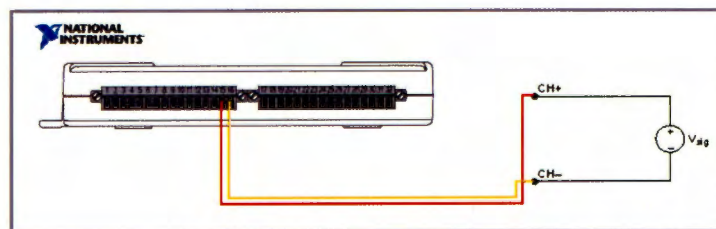


Figura 6.3 Conexión de la señal de entrada ai0

6.1.2 Entrada analógica de corriente (Transmisor de flujo)

Continuando con la metodología de la señal de entrada de voltaje, se utilizó el asistente DAQ Assistant para configurar la captura de la señal de corriente que genera el transmisor de flujo. Luego de seleccionar que la señal a medir es de corriente a través del canal ai1. El asistente muestra la ventana que se observa en la Figura 6.4. Como la corriente que genera el transmisor de flujo va de 4 a 20 mA, los límites de captura fueron establecidos en un rango de 0 a 24 mA para evitar que un pico de corriente desbordara la tarjeta y detuviera la ejecución del VI; la frecuencia de muestreo elegida nuevamente fue de 1 Sample (On Demand). Al igual que en la configuración de voltaje, el asistente muestra la correcta conexión de la señal de entrada como en la Figura 6.5. Como la tarjeta no mide directamente corriente, sino que hace una transducción de voltaje. Se colocó físicamente una resistencia de prueba y se le indicó al asistente el valor de aquella en el campo Shunt Resistor.

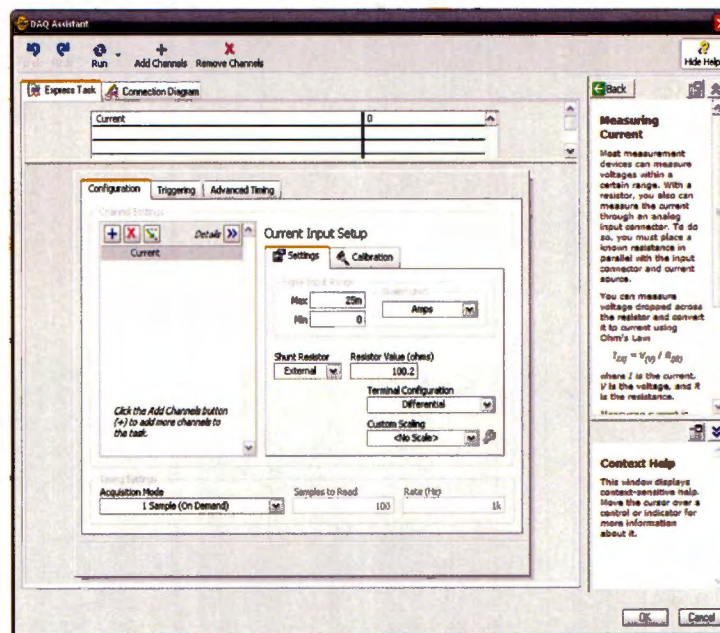


Figura 6.4 Ventana de configuración

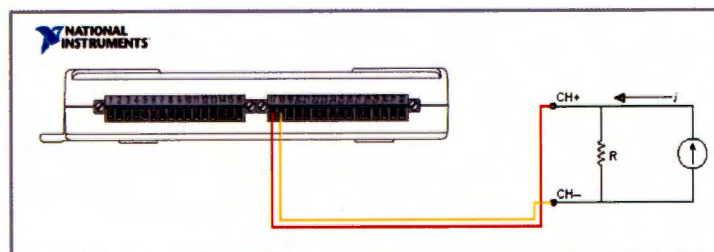
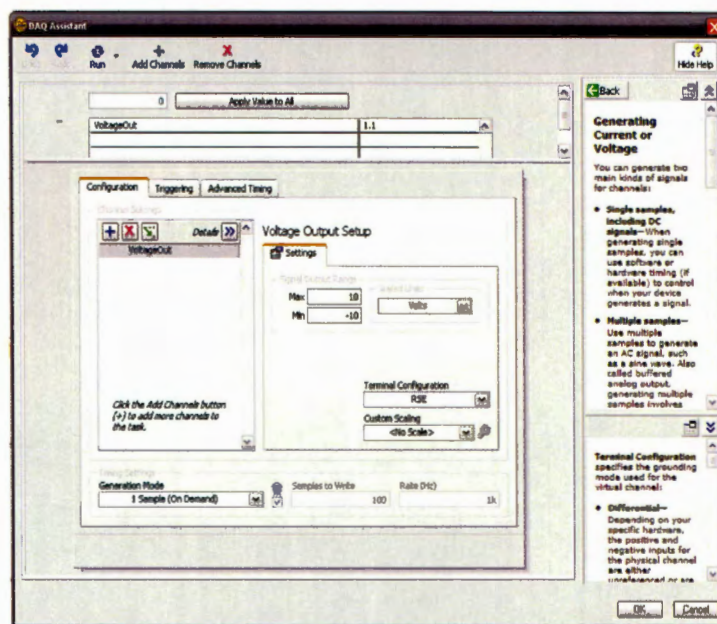


Figura 6.5 Conexión de la señal de entrada ai1

6.1.3 Salida analógica de voltaje (Convertidor I/P)

Para configurar la salida analógica se hizo exactamente lo mismo que para la entrada analógica de voltaje con la diferencia de que al inicio del asistente de configuración se seleccionó una salida analógica de voltaje eligiendo el canal ao0. El límite de voltaje que muestra esta ventana es suficiente para cubrir los requerimientos del sistema propuesto, y la frecuencia de generación de la señal se estableció nuevamente en 1 Sample (On Demand), tal como se puede observar en la Figura 6.6. Para esta opción el programa no muestra la correcta conexión de la señal de salida, sin embargo en la tarjeta se puede leer físicamente el canal de salida analógico ao0 y su respectiva tierra. La correcta conexión se muestra en la Figura 6.7.



Tecnología de Fronteras, Campus Ciudad de México
Biblioteca

Figura 6.6 Ventana de configuración

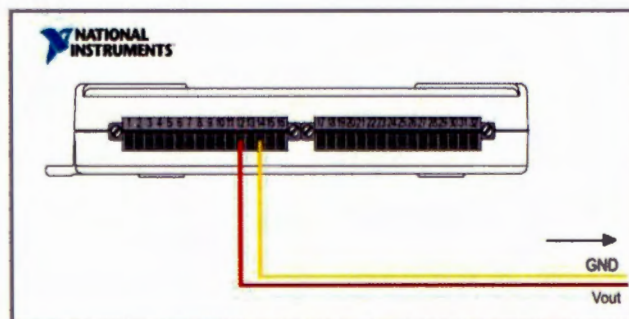


Figura 6.7 Conexión de la señal de salida ao0

Pero la señal que recibe el convertidor I/P IYT 100 es una corriente analógica de corriente así que tuvo que acondicionar la señal para cubrir con los requerimientos del convertidor.

6.2 Interfaz de conexiones DAQ – Amatrol

La interfaz de conexiones es un puente importante entre la tarjeta de adquisición de datos y el Amatrol, ya que acondiciona la señal que genera la DAQ, contiene elementos de protección para los diferentes sensores y actuadores y facilita interconexión por medio de jacks de conexión banana.

Para acondicionar la señal de voltaje generada por la DAQ a una señal de corriente requerida por el convertidor I/P, se diseñó un convertidor de voltaje a corriente con carga flotada que cumpliera con las siguientes características de diseño mostradas en la Figura 6.8.

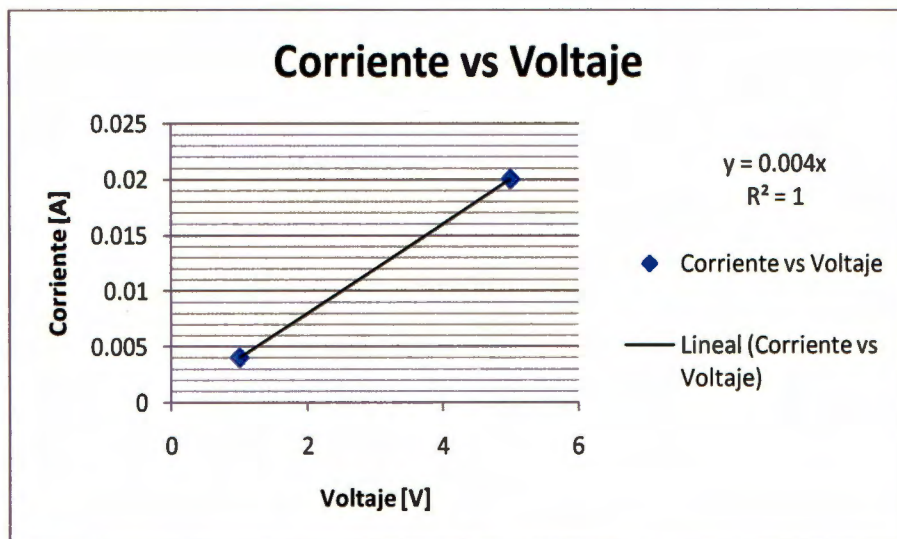


Figura 6.8 Gráfica característica del convertidor V-I

El diagrama del convertidor de voltaje a corriente elegido se muestra en la Figura 6.9, a partir de él se obtuvo la ecuación que lo caracteriza siendo la que se muestra en la ecuación 6.1.

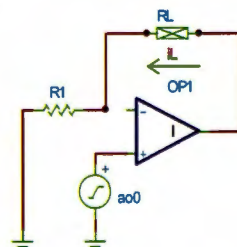


Figura 6.9 Convertidor V-I con carga flotada

$$i_L = \frac{ao0}{R1} \quad (6.1)$$

En donde R_L corresponde a la carga, y $ao0$ corresponde al voltaje proporcionado por la DAQ. Pero la ecuación de la recta obtenida de la característica de la señal deseada se puede expresar de la siguiente manera

$$i_L = 0.004 \cdot ao0 - 0 \quad (6.2)$$

Igualando ambas ecuaciones, las dos ecuaciones anteriores (6.1 y 6.2), se pudo calcular la resistencia $R1$ como se puede observar

$$\frac{ao0}{R1} = 0.004 \cdot ao0 \rightarrow R1 = 250 \Omega \quad (6.3)$$

En la Figura 6.10 se puede apreciar el diagrama eléctrico de la interfaz de conexiones.

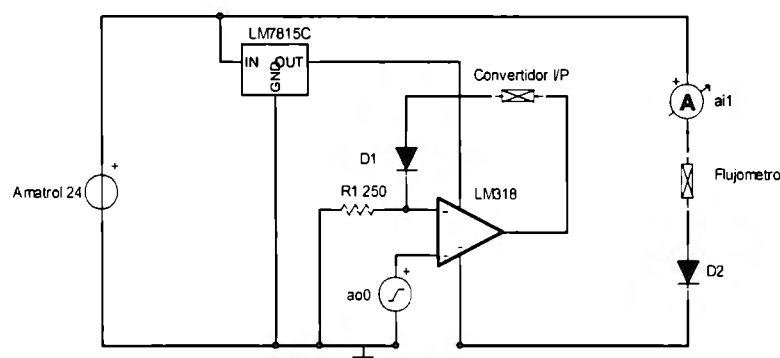


Figura 6.10 Diagrama eléctrico de la interfaz de conexiones.

En donde $ai1$ corresponde a la entrada analógica de corriente de la DAQ y $ao0$ a su salida analógica de voltaje. Como se puede apreciar en la Figura 6.10 $D1$ y $D2$ se utilizan para proteger a los componentes del Amatrol de un posible regreso de corriente. Una vez teniendo el diagrama eléctrico se procedió a generar un esquemático y un diagrama PCB, Figura 6.11 y Figura 6.12 respectivamente, para pasar el circuito a una tarjeta impresa.

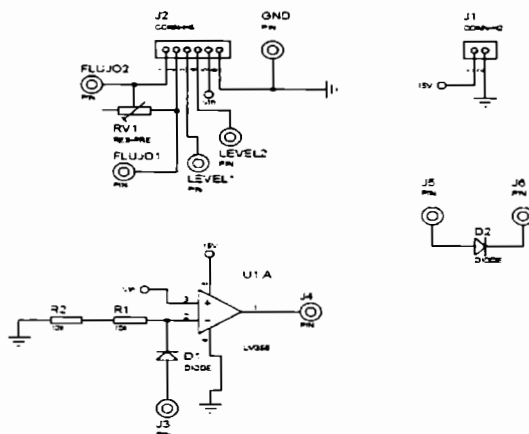


Figura 6.11 Diagrama esquemático de la interfaz de conexiones.

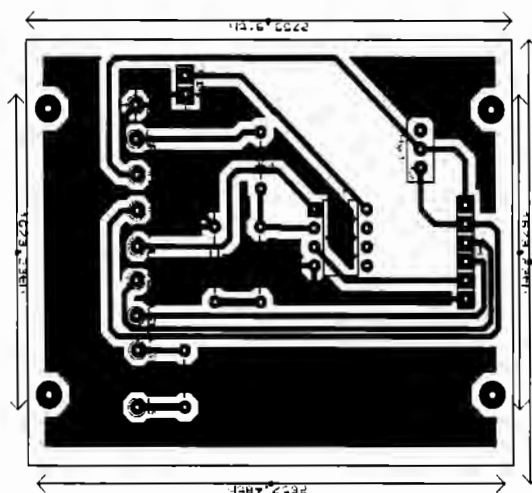


Figura 6.12 Diagrama PCB de la interfaz de conexiones.

El producto final es una caja con jacks para la conexión de cables banana cuyo mapa de conexiones obedece a la Figura 6.13.

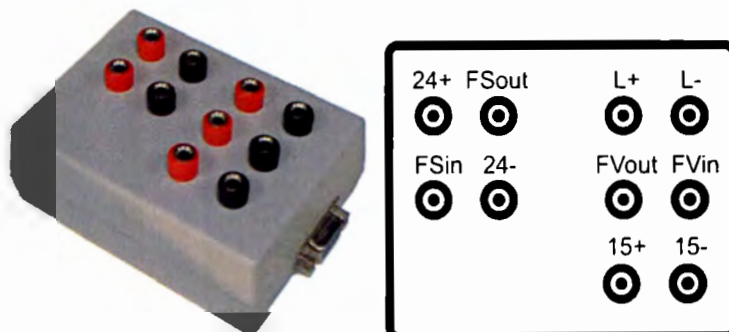


Figura 6.13 Vista externa de la interfaz de conexiones y mapa de conexiones

En donde 24+ corresponde a una señal de 24 V obtenida del Amatrol, FSout se conecta a la entrada del transmisor de flujo, FSin es el regreso del transmisor de flujo y 24- cierra el circuito regresando el voltaje de 24 V a el Amatrol; L+ corresponde a la entrada positiva del sensor ultrasónico, L- se conecta a la entrada negativa del mismo sensor; FVout se conecta a la entrada del convertidor I/P y FVin es el regreso del mismo; finalmente 15+ y 15- son la entrada y regreso de la fuente de poder respectivamente.

Para conectar a la interfaz con la DAQ se ensambló un conector DB 9 cuyo código de colores se muestra en la Figura 6.14.

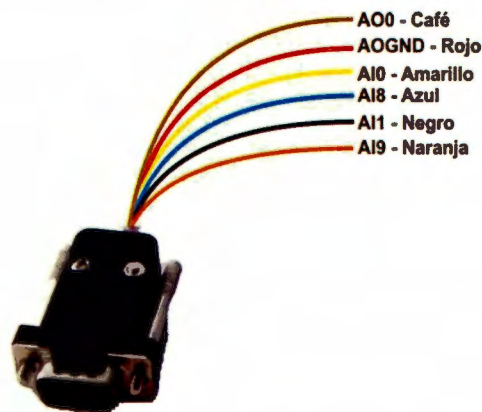


Figura 6.14 Interconexión DB 9 – DAQ

6.3 Implementación del regulador PID en LabVIEW

Una vez que se configuraron las entradas y salidas se simuló la red de tuberías del sistema así como sus tanques de proceso y de reserva y se agregaron indicadores y controles para hacer un VI atractivo a la vista, a la vez de ser muy intuitivo e ilustrativo del proceso que se está llevando a cabo como se muestra en la Figura 6.15.

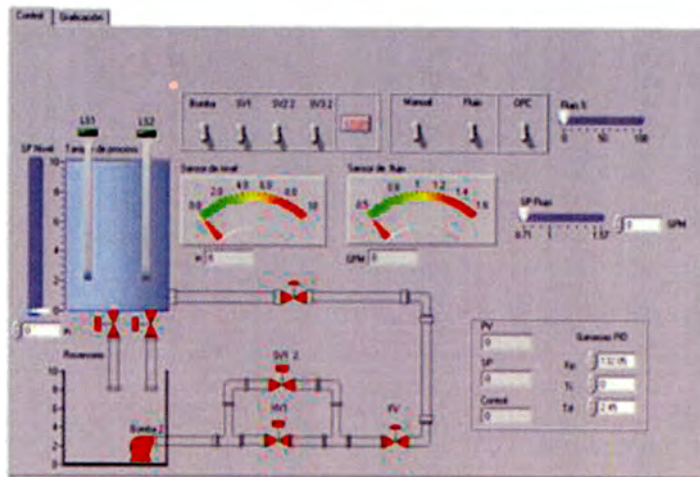


Figura 6.15 Interfaz Gráfica del Usuario

Gracias a la programación el sistema es capaz de controlar los lazos de nivel y de flujo y pasar de manual a automático, simplemente accionando un par de interruptores que se muestran en la Figura 6.16.

Lazo de control

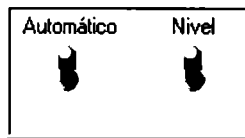


Figura 6.16 Selectores de lazo de control

Y los parámetros de sintonización K_p , T_i y T_d pueden ser modificados para ajustarlo a las necesidades de sintonización de cada lazo de control. Pudiéndose incluso ajustar durante la ejecución del VI para observar la reacción del sistema a dichos cambios. Los campos de modificación de los parámetros se muestran en la Figura 6.17.

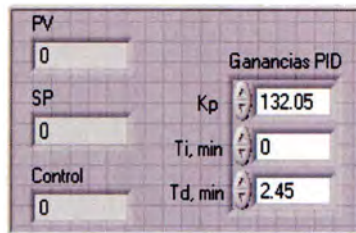


Figura 6.17 Campos de ajuste PID

Para tener una imagen más clara de lo que está sucediendo internamente el VI muestra una ventana en la que las señales de la variable de proceso (PV), el punto de ajuste (SP), la señal de control ($U(t)$) y el error acumulado del controlador ($E(t)$) son graficadas contra el tiempo. Tal como se observa en la Figura 6.18.

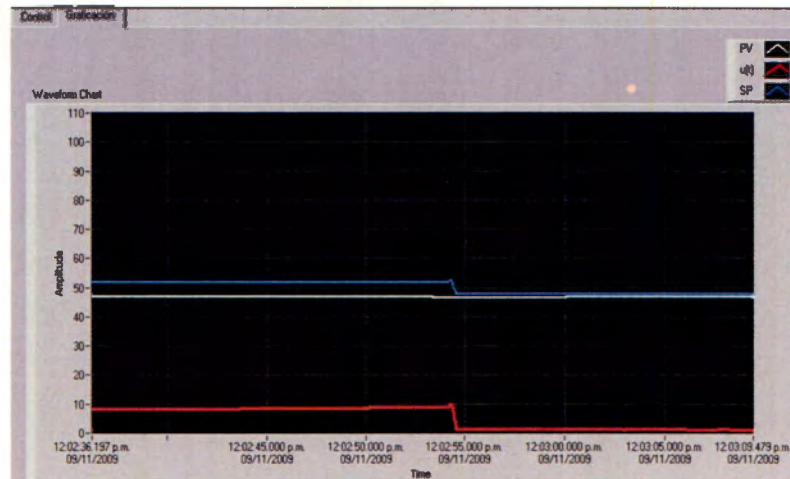


Figura 6.18 Ventana de graficación PV, SP, U(t) y E(t)

Para poder implementar efectivamente el control fue necesario hacer un escalamiento tanto de las señales de entrada como la señal de salida; ya que en una primera instancia las señales se encontraban en distintas escalas e incluso la señal del sensor ultrasónico era inversamente proporcional al llenado. Es aquí donde la caracterización de los sensores y actuadores cobró importancia.

Las señales de los sensores de ambos lazos fueron escalados de cero a 100 unidades. Los escalamientos generaron un par de ecuaciones, mismas que fueron utilizadas en una expresión matemática dentro del Diagrama de Bloques del VI. Los escalamientos del sensor ultrasónico de nivel y del transmisor de flujo y sus ecuaciones se muestran a continuación en la Figura 6.19, ecuación 6.4, Figura 6.20 y ecuación 6.5 respectivamente.

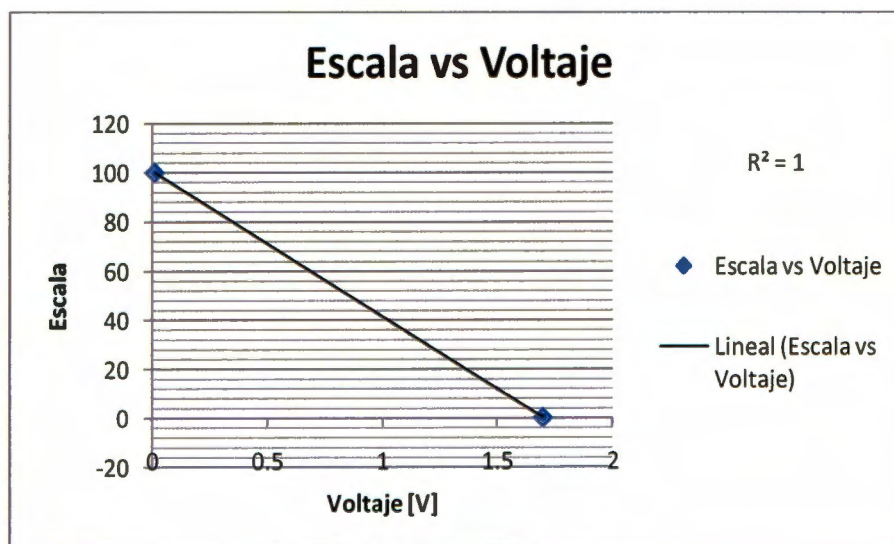


Figura 6.19 Escalamiento del sensor ultrasónico

$$y = -59.172x + 100.59 \quad (6.4)$$

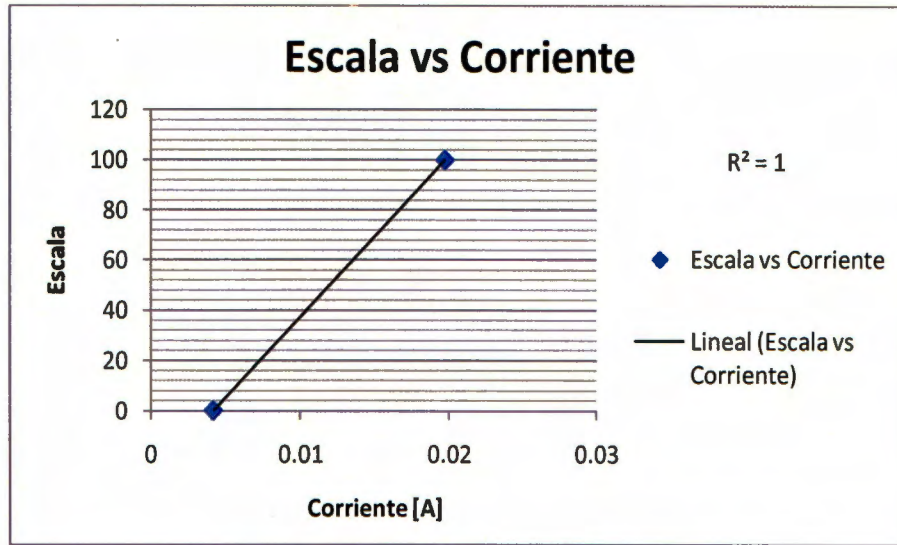


Figura 6.20 Escalamiento del transmisor de flujo

$$y = 6435x - 27.027 \quad (6.5)$$

De la misma manera y como la señal de control fue limitada entre 0 y 100, se tuvo que escalar de 1 a 5 V para después controlar con ese voltaje a la válvula proporcional a través del convertidor V-I que generó una señal de corriente de 4 a 20 mA, que a su vez es la entrada del convertidor I-P. El escalamiento y su ecuación se muestran a continuación en la Figura 6.21 y ecuación 6.6 respectivamente.

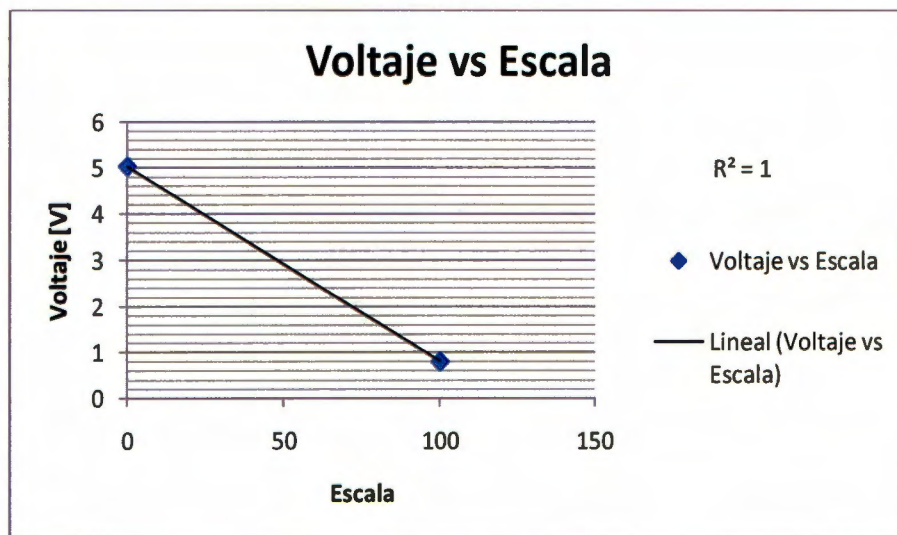


Figura 6.21 Des escalamiento para el convertidor V-I

$$y = -0.0423x + 5.02 \quad (6.6)$$

6.4 Implementación del regulador PID en el PLC Simatic 300

Existen 5 tipos de controladores PID dentro del CPU 314C-2DP. Estos son: FB 41 CONT_C CONT, FB42 CONT_S CONT, FB43 PULSEGEN CONT, FB 58 TCONT_CP y FB 59 TCONT_S. Cada uno posee diferentes características, y ese es la razón por la cual las dos opciones viables y las cuales se sujetan a las necesidades del proyecto son FB 41 CONT_C CONT y FB 58 TCONT_CP.

6.4.1 Módulo PID FB 41 CONT_C CONT

Como ya se mencionó antes, el FB 41 es la mejor opción en regulador PID. Existen varios parámetros de entrada, de salida y de entrada-salida. En la sección de Anexos, existe la tabla con todas las variables. El diagrama a bloques de este módulo es el que se muestra en la Figura 6.22.

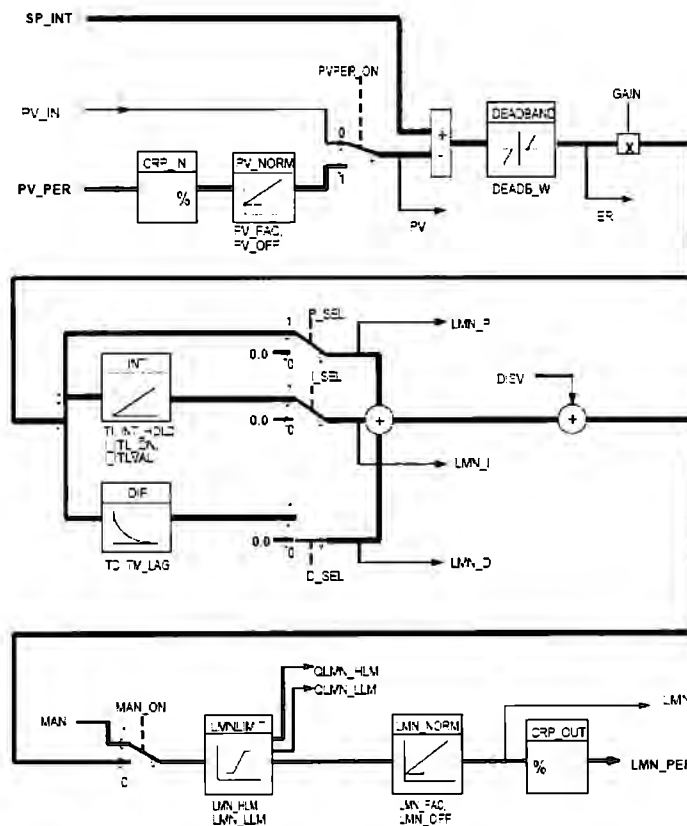


Figura 6.22 Diagrama a bloques del módulo FB 41

El módulo FB41 está ligado a un DB 41. Para que pueda correr sin ningún problema necesita de un OB1 (arranque inicial), un OB35 (Alarma cíclica) y un OB100 (modo de arranque completo)

Los cálculos para el FB 41 son los siguientes.

COM_RST → Se desea que el programa tenga una inicialización de reseteo por lo que esta variable se debe colocar en TRUE. Según las especificaciones de SIEMENS, en los ejemplos del PLC, esta variable debe ser llamada desde el OB100 como "DB_CONT_C".COM_RST, para que no exista un error de declaración, esta se tiene que dar de alta en la tabla de símbolos (Figura 6.23).

Programa S7(1) (Símbolos) -- prueba2514\SIMATIC 300(1)\CPU 314C-2 DP					
	Estado	Símbolo	Dirección	Tipo de dato	Comentario
1		COMPLETE RESTART	OB 100	OB 100	Complete Restart
2		CONT_C	FB 41	FB 41	Continuous Control
3		CYC_INT	OB 35	OB 35	
4		CYCL_EXC	OB 1	OB 1	Cycle Execution
5		DB_CONT_C	DB 41	FB 41	
6		VAT_LOOPCONTROL	VAT 1		

Figura 6.23 Tabla de Símbolos

MAN_ON → No se quiere tener el modo manual en el programa, ya que si esto sucede el lazo no se cerraría. Por lo tanto esta variable se pone en FALSE.

PVPER_ON → esta variable es la que permite que la variable de proceso entre por medio de la periferia. Por lo que debe estar en TRUE. La Figura 6.24 muestra esta variable.

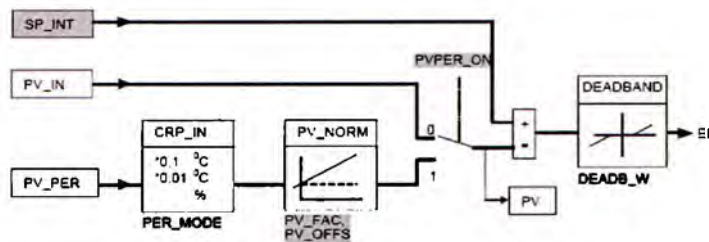


Figura 6.24 Parte del Diagrama de bloque del FB 41

P_SEL → La parte proporcional se desea tanto en el control de flujo como en el de nivel, por lo que se pone en TRUE.

I_SEL → para el caso de control de nivel, esta opción es deshabilitada por medio de FALSE; en el caso del control de flujo esta está habilitada con TRUE.

INT_HOLD → en el caso del control de nivel no se desea la parte integradora, por lo que esta variable debe estar en FALSE.

I_ITL_ON → en el caso del control de nivel no se desea la parte integradora, por lo que esta variable debe estar en FALSE.

D_SEL → para el caso de control de nivel, esta opción es habilitada por medio de TRUE; en el caso del control de flujo esta está deshabilitada con FALSE.

CYCLE → Se toma de especificaciones que el sistema está cargado con 10ms.

SP_INT → Dado que todo está normalizado en porcentaje. El set point debe estar de 0 a 100%, su entrada es por medio de formato flotante.

PV_IN → Como se observa en la Figura 6.24 la PV_IN va a ser descartada, ya que la entrada de la variable de proceso se necesita por medio de la periferia.

PV_PER → Como se observa en la Figura 6.24 es la entrada del módulo analógico.

MAN → En esta variable no se pone nada.

GAIN → Esta es la ganancia por lo que depende del sistema el valor que se ponga. Se debe declarar como por ejemplo 20.0.

TI → Dependiendo del lazo en el que se esté trabajando es si esta opción esta activada o no.

TD → Dependiendo del lazo en el que se esté trabajando es si esta opción esta activada o no. Se carga como $T\#(num)s$.

DEADB_W → Para este sistema no es necesario una banda muerta.

PV_FAC → La Figura 6.25 muestra el comportamiento del sensor ultrasónico. En la Figura 6.24 se observa que antes de PV_NORM esta CRP_IN. Por especificaciones de SIEMENS se sabe que la salida del bloque CPR_IN es $PV_PER * 100 / 27648$.

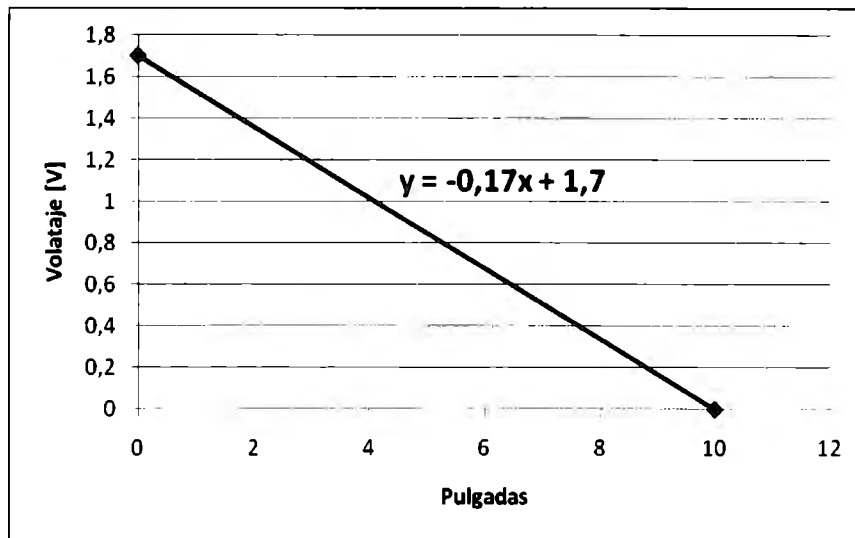


Figura 6.25 Gráfica de caracterización del sensor ultrasónico

Cuando se aplica un voltaje de 0V a la entrada periférica, el valor decimal en el CPU es de 0; en el caso de inyectar 1.7 V al módulo análogo su valor interno será de 4800 decimal. Entonces

$$\text{Con } 0 \text{ V} \rightarrow \text{CPR_IN} = 0 * \frac{100}{27648} = 0$$

$$\text{Con } 1,7 \text{ V} \rightarrow \text{CPR_IN} = 4800 * \frac{100}{27648} = 17,36$$

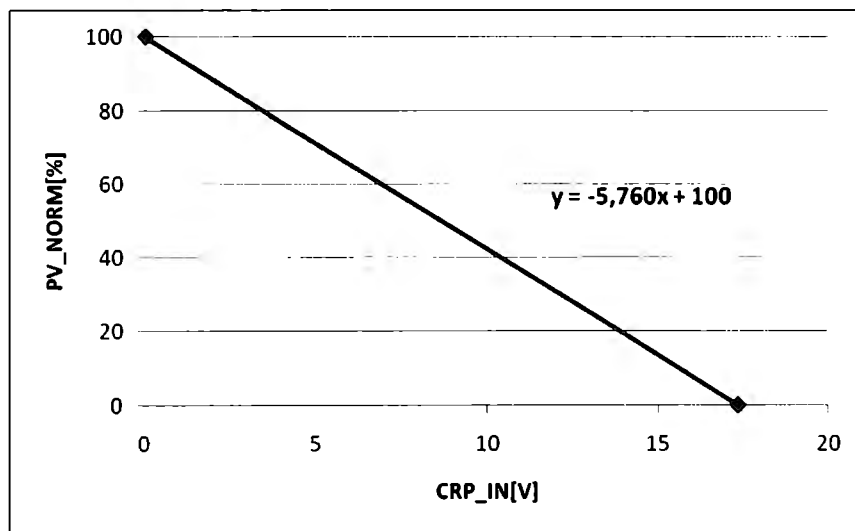


Figura 6.26 Gráfica de normalización del sensor ultrasónico

Con la ecuación se determina que PV_FAC es la pendiente en este caso -5,760.

PV_OFF \rightarrow PV_FAC está relacionado con PV_OFF. Para la Grafica X (anterior) el valor debe ser 100.

LMN_FAC → Es el inverso de PV_FAC.

LMN_OFF → Es el inverso de PV_OFF.

6.5 Comunicación OPC

Para dar solución a la comunicación entre el PLC Simatic S7-300 de Siemens y el LabVIEW de National Instruments, se utilizó el protocolo OPC. Lo primero que se requirió fue dar de alta un servidor OPC el cual sirvió de puente entre los dos dispositivos. Para ello se utilizó el programa de National Instruments "NI OPC Servers".

6.5.1 Servidor OPC

El primer paso para implementar la comunicación OPC utilizando OPC Servers es dar de alta y configurar el canal de comunicación con el que se va a trabajar. El software permite elegir el canal de comunicación que se desea crear dependiendo del fabricante del dispositivo con el que se trabaja. En este caso se trabajó con el canal Ethernet para Siemens ya que es la comunicación más fácil de configurar y en los laboratorios de electrónica se cuenta con el módulo Ethernet. La Figura 6.27 muestra la elección del canal de comunicación.

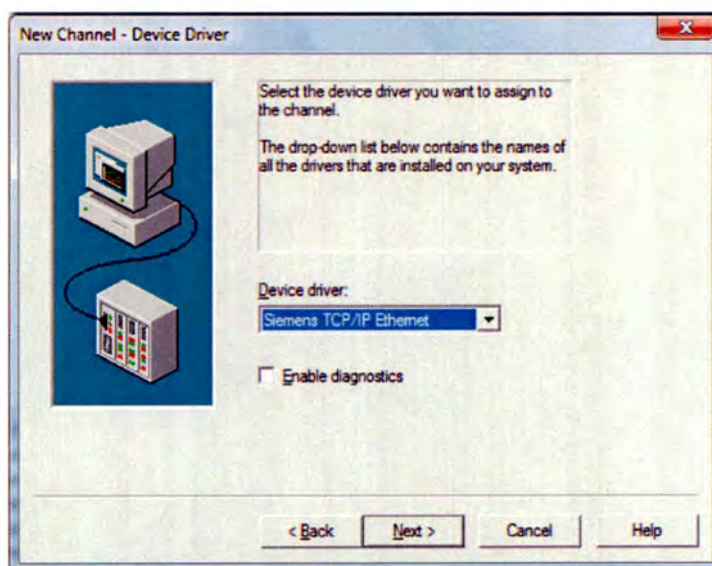


Figura 6.27 Selección del canal de comunicación del servidor OPC

Después de seleccionar el canal de comunicación, se debe asignar una dirección IP al dispositivo. Para poder asignar una dirección al PLC Siemens Simatic S7-300 es necesario primero dar de alta y configurar el módulo Ethernet del PLC. Para ello se utilizó el software Step 7 de Siemens. Con esta herramienta se puede cargar la configuración de hardware del PLC. La dirección IP asignada al PLC fue 192.168.0.2, cuidando siempre que el PLC y la computadora tuvieran la misma máscara de subred, 255.255.255.0. La Figura 6.28 muestra la configuración del Hardware del PLC.

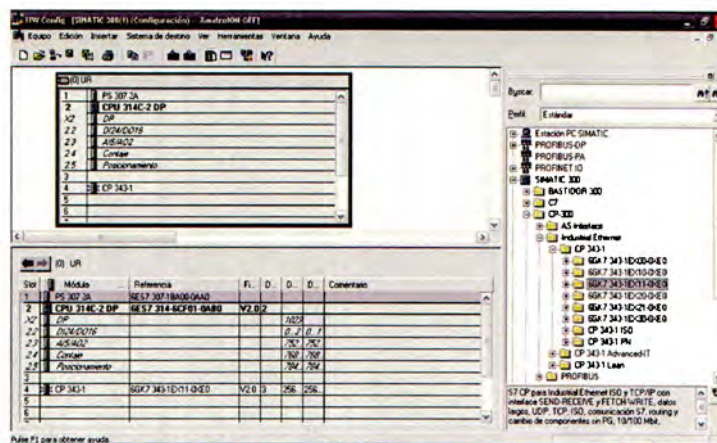


Figura 6.28 Configuración del hardware en Step 7

Una vez cargada la configuración anterior, el módulo Ethernet quedó listo para trabajar y el canal creado para NI OPC Servers quedó listo. Después de crear el canal de comunicación se seleccionó el dispositivo con el que se va a trabajar, asignándole un nombre con el cual el sistema lo referenciará. El dispositivo seleccionado fue S7-300 que es el modelo del PLC con el que se trabajó y el nombre asignado fue PLC Simatic S7-300.

Al tener lista la comunicación, se dieron de alta las variables que se querían monitorear por medio de Tags. Para asignarlas se debe escribir el nombre de la variable y luego la dirección que debe ser congruente con la de la variable del PLC a monitorear. Como la aplicación que se está monitoreando tiene entradas y salidas digitales (booleanas); las direcciones seleccionadas en la configuración de las Tags fueron: I00.0, I00.1, I00.2; Q00.0, Q00.1 y Q00.2 que corresponden a las direcciones I0.0, I0.1, I0.2, Q0.0, Q0.1 y Q0.2 del PLC respectivamente. Tal y como se observa en la Figura 6.29.

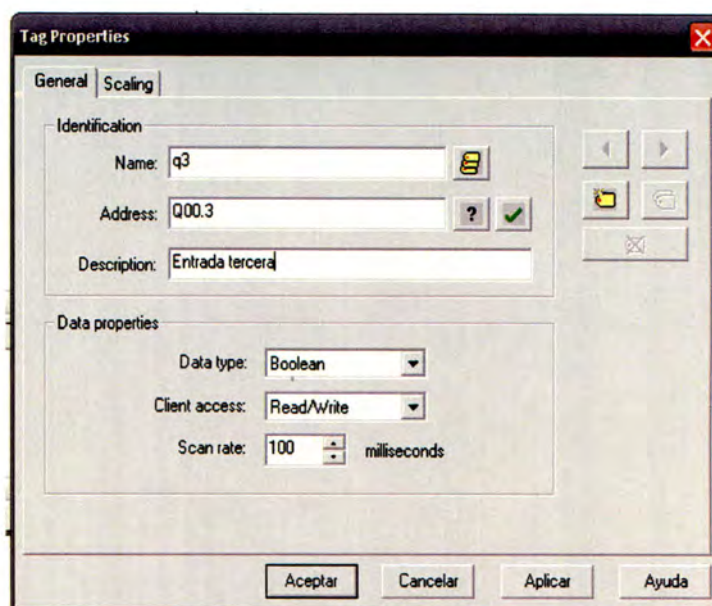


Figura 6.29 Configuración de variables a monitorear

Al haber dado de alta las variables, se puede hacer una prueba rápida de la correcta configuración y la comunicación utilizando OPC quick client, que es una herramienta de NI OPC Servers que permite crear un cliente rápido para monitorear las variables creadas.

Después de llevar acabo todo lo anterior, las variables quedaron dadas de alta en el servidor OPC y estuvieron listas para ser utilizadas por diferentes clientes OPC. Los clientes OPC pueden ser diferentes aplicaciones, en este caso la aplicación elegida fue LabVIEW.

6.5.2 Cliente OPC

Para crear un cliente OPC desde LabVIEW se debe de crear un nuevo proyecto vacío. En el administrador de proyecto y sobre el ícono de My Computer crear un nuevo I/O Server en el que se seleccionó la opción OPC Client. Dentro de la ventana de configuración se modificó el tiempo de actualización y el servidor OPC con el que se iba a comunicar. Como se muestra en la Figura 6.30.

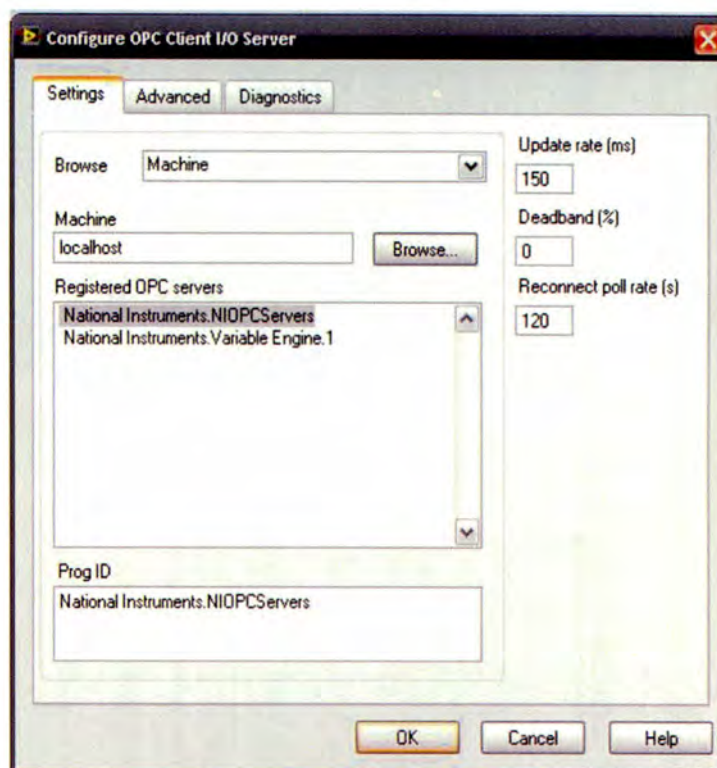


Figura 6.30 Ventana de configuración del cliente OPC

Después de crear la instancia de cliente, se crearon las variables con las que se trabajaron, las cuales se ligaron a las variables que se levantaron en el servidor OPC. La creación de variables se hace en la misma librería en la que se creó el cliente OPC, para hacer esto se buscaron las variables creadas en el servidor y se ligaron a las del cliente. La Figura 6.31 y la Figura 6.32 muestran la configuración de las variables.

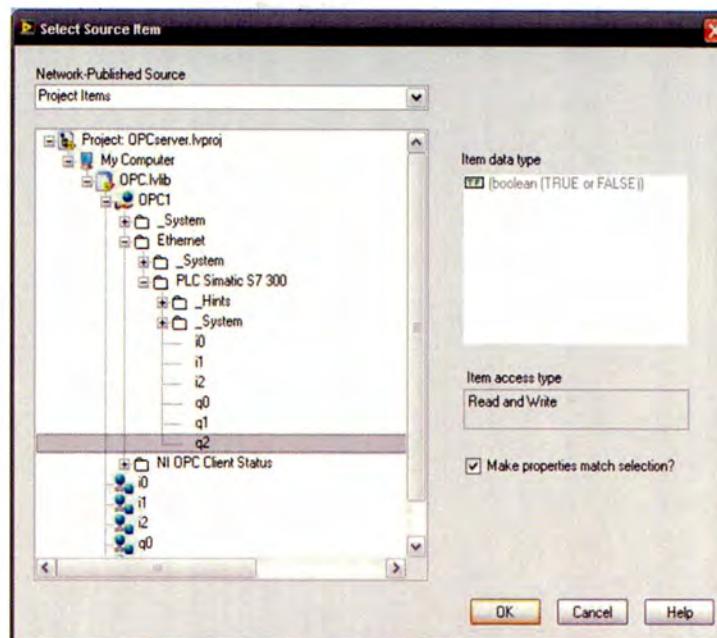


Figura 6.31 Ligado de variables a monitorear

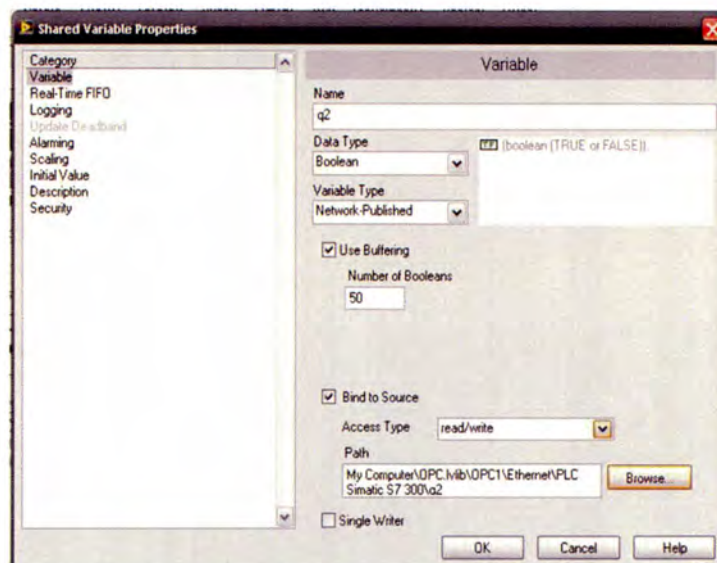


Figura 6.32 Configuración de variables ligadas

Una vez que las variables quedaron configuradas estuvieron listas para ser utilizadas en cualquier VI creado dentro de la misma librería. Simplemente se arrastró la variable dentro del Diagrama de Bloques.

6.5.3 Monitoreo

Para probar que el funcionamiento del cliente OPC de LabVIEW era correcto se programó un control ON-OFF en el Step 7 de acuerdo al diagrama de la Figura 6.33.

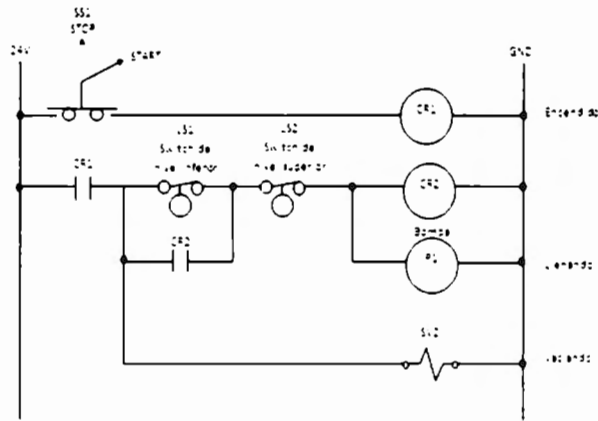


Figura 6.33 Diagrama básico de control ON-OFF

El diagrama anterior se traduce a lenguaje escalera como se muestra en la Figura 6.34.

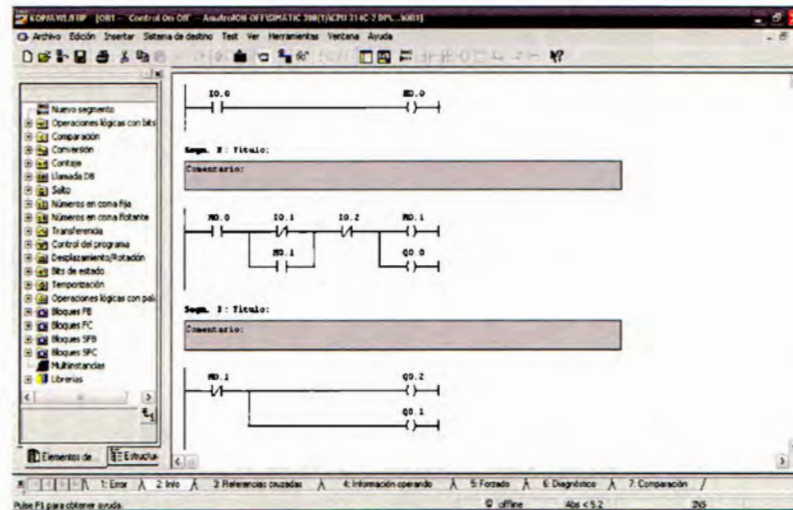


Figura 6.34 Programación en Step 7

Para este sistema, la entrada IO.0 fue accionada por un botón con enclave, IO.1 corresponde al interruptor de nivel bajo e IO.2 al interruptor de nivel alto, ambos del Amatrol. La salida Q0.0 accionó la válvula solenoide SV1 que es la que permite o impide el paso del agua al sistema; y las salidas Q0.1 y Q0.2 accionaron las válvulas solenoides SV2 y SV3 que permiten el drenado del tanque de procesos.

Como se puede apreciar las entradas y salidas del programa son consistentes con las direcciones que se configuraron en el servidor OPC y que después fueron ligadas con variables del cliente OPC. Al ser entradas y salidas digitales, el monitoreo se hizo con indicadores booleanos como se muestra en la Figura 6.35.

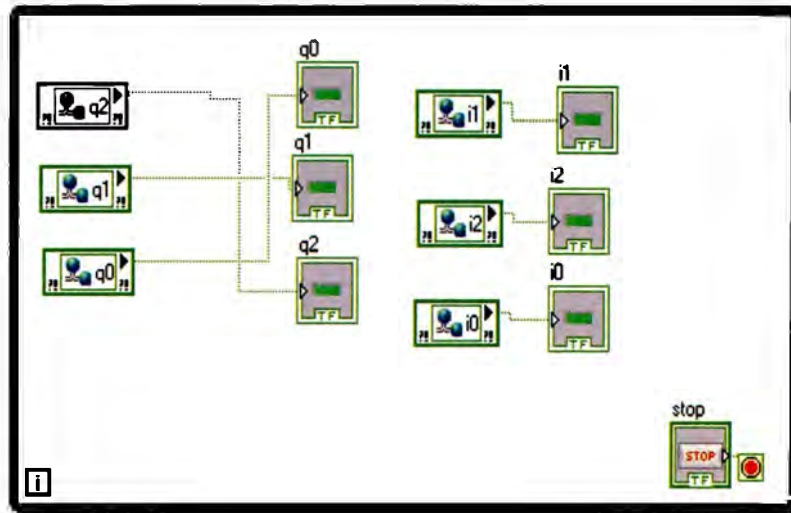


Figura 6.35 Monitoreo de variables por medio de LabVIEW

Una vez comprobado el funcionamiento del monitoreo de las variables se procedió a incorporar dicho monitoreo al sistema programado previamente en LabVIEW quedando la carátula del VI como se muestra en la Figura 6.36.

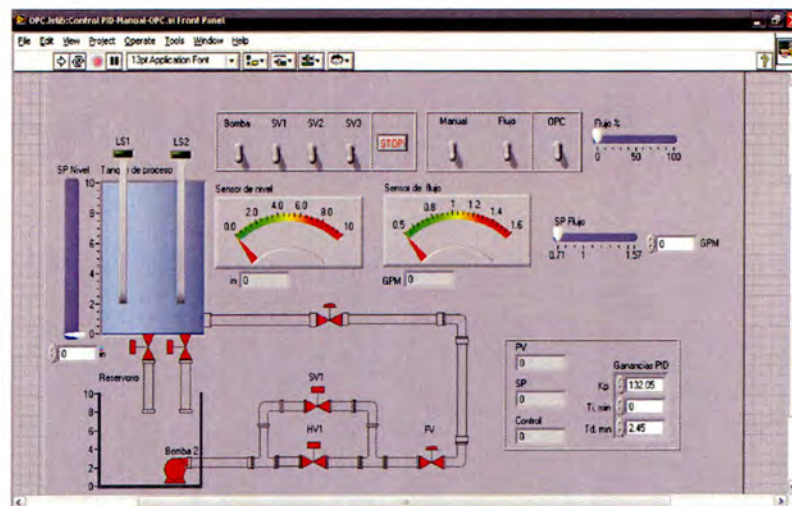


Figura 6.36 Carátula final de la Interfaz Gráfica del Usuario

Con este sistema se dio solución a la implementación de la comunicación PLC – LabVIEW por medio de un servidor OPC. Mayores conclusiones sobre el servidor OPC se harán en el capítulo correspondiente.

Capítulo 7 Resultados y Conclusiones

Este proyecto tuvo una duración de un año, dos ciclos escolares completos con un verano de por medio. Durante de este periodo se cumplieron, casi en su totalidad, las expectativas que se propusieron en un principio. Para poder hacer un análisis objetivo de los resultados obtenidos, estos se tienen que cotejar con los objetivos establecidos al principio del proyecto.

Los objetivos generales del proyecto involucraban la continuación del trabajo realizado durante la primera parte del proyecto, en la cual se logró el entendimiento de cada una de los dispositivos que existen en el Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552; y la puesta en operación del sistema, entendiéndose como tal la puesta en marcha del proceso de llenado, pudiendo controlar el flujo y el nivel de líquido de manera automática. El primer trabajo a realizar fue el reconocimiento de todos los elementos que componen el Amatrol T5552. Su funcionamiento y características fueron desglosados por medio de hojas de especificaciones y manuales. Para entender cabalmente el entendimiento de cada uno de los componentes del sistema se tuvo la necesidad de caracterizar su operación. El resultado de la caracterización se puede revisar en el Capítulo 4 de este documento. Se puede concluir a partir de las gráficas, que todos los dispositivos, una vez calibrados, operan conforme a las especificaciones de sus fabricantes manteniendo en su mayoría una relación lineal, a excepción de la válvula proporcional que guarda la relación exponencial negativa esperada.

Para poner en operación el sistema regulando los diferentes lazos de control fue necesario conocer primero las funciones de transferencia de cada lazo a controlar. Como se muestra en el Capítulo 5, dichas funciones se obtuvieron a partir de la curva de reacción medidas en un osciloscopio. En la aplicación Simulink de Matlab se graficó la respuesta de ambas funciones de transferencia a una excitación unitaria, las curvas resultantes se compararon con las obtenidas en el osciloscopio confirmando de esta manera la veracidad de ambas funciones.

El diseño e implementación del controlador PID se realizó por medio del programa LabVIEW de National Instruments y por medio de un PLC Simatic S7 – 300 de Siemens. Para determinar el buen funcionamiento del VI de LabVIEW se realizaron diversas pruebas en varios marcos de reproducción. En el caso de la implementación de los controles de nivel y flujo para el PLC no se logró por completo, ya que varias variables no se lograron resetear para poder guardar los distintos valores de entrada. Esta parte del proyecto tiene mucho potencial y se puede ver como trabajo a futuro.

En el caso del LabVIEW Se utilizó una tarjeta de adquisición de datos NI USB – 6211 para medir las señales generadas por los sensores del Amatrol y para generar la señal que controlaría la válvula proporcional. Se utilizaron las caracterizaciones para escalar las señales a un nivel de 0 a 100. Se utilizó la identificación de las dinámicas de los lazos de flujo y nivel para encontrar los valores de sintonización del bloque control PID. Se graficó la señal de control, la variable de proceso y el setpoint contra el tiempo para ver la eficiencia del sistema propuesto.

Para el lazo de nivel se puede apreciar una diferencia mínima entre la variable de proceso y el punto de ajuste que es de 2.2%, como se puede observar en la Figura 7.1. Utilizando un bloque de control PID programado en base a un manual.

Debido de la acumulación del error en este bloque PID, el sistema presentaba picos en la señal de control de manera periódica. Por lo que se decidió filtrar la señal de control promediando 25 muestras de la señal de control para el lazo de nivel y tan solo 5 en el lazo de control debido a su velocidad. El filtrado de muestra en la Figura 7.2.

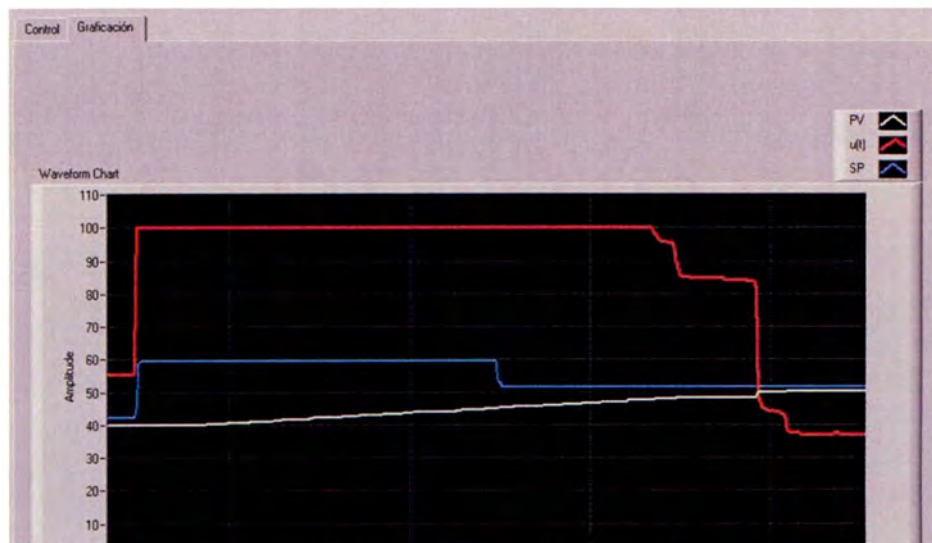


Figura 7.1 Gráfica de operación del lazo de nivel

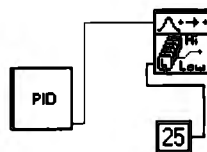


Figura 7.2 Filtrado de la señal de control

Para el lazo de flujo se puede apreciar una gran diferencia entre la variable de proceso y el punto de ajuste que es de 11.23% en promedio, tal y como se puede observar en la Figura 7.3, sin embargo al comparar el punto de ajuste con la medición directa del display del transmisor de flujo, la diferencia es de tan solo 2.45%. De manera diferente a lo que ocurre con el lazo de nivel, la señal de control oscila en el tiempo. El problema es que esta señal de control no logra que la variable de proceso alcance al el set point.

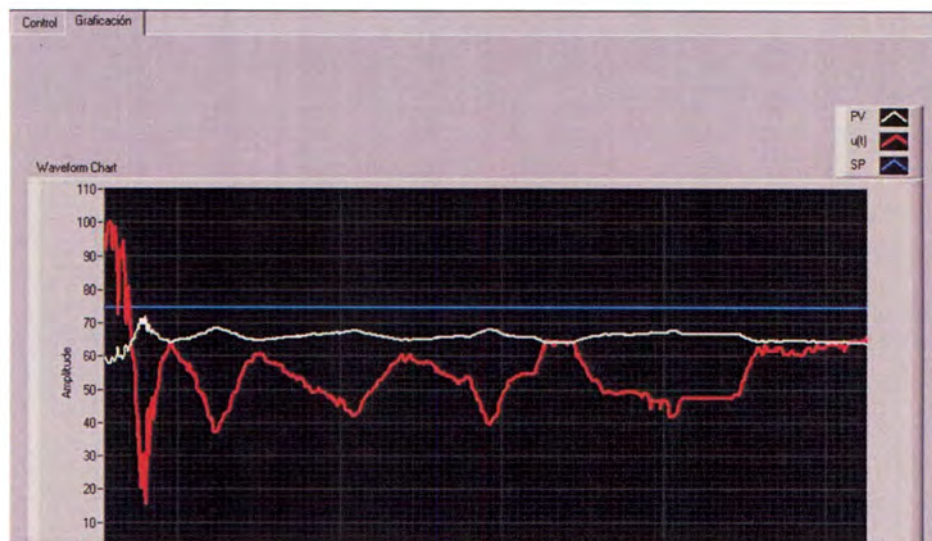


Figura 7.3 Gráfica de operación del lazo de flujo

Se realizó una interfaz de conexiones DAQ-Amatrol, la cual contiene todos los circuitos necesarios para su comunicación y acondicionamiento de señales. De esta manera no existen problemas de cables y circuitería convencionales que existen en un protoboard. Con forme se fue avanzando en la investigación y desarrollo para el logro de los objetivos, se fue creando una serie de manuales para la realización de prácticas de laboratorio para que en un futuro el sistema pueda ser utilizado de manera didáctica por los alumnos de las diferentes materias orientadas a control moderno. En ellas se logra explicar de manera clara y detallando paso a paso las diferentes conexiones, calibraciones y configuraciones que el alumno debe de realizar para alcanzar los objetivos de la práctica y así llevar a la práctica las teorías vistas en clase.

La realización de la comunicación OPC se llevó a cabo de manera eficiente. Para esta comunicación se realizó un control ON – OFF programándolo en el PLC y monitoreando las entradas y salidas del mismo por medio de LabVIEW. Como se puede apreciar en la Figura 7.4, mientras los dos interruptores de nivel, LS1 y LS2, no se encontraran cerrados, el sistema mantiene la válvula solenoide SV1 abierta permitiendo así el flujo de agua y las válvulas SV2 y SV3 cerradas evitando el drenado del tanque de proceso. La Figura 7.5

muestra el proceso inverso. Una vez que los dos interruptores de nivel LS1 y LS2 están cerrados, el sistema de control abrirá las válvulas SV2 y SV3 permitiendo el drenado y cerrando la válvula SV1 para restringir el paso de agua. Este proceso de vaciado se llevará a cabo hasta que los dos interruptores vuelvan a encontrarse abiertos.

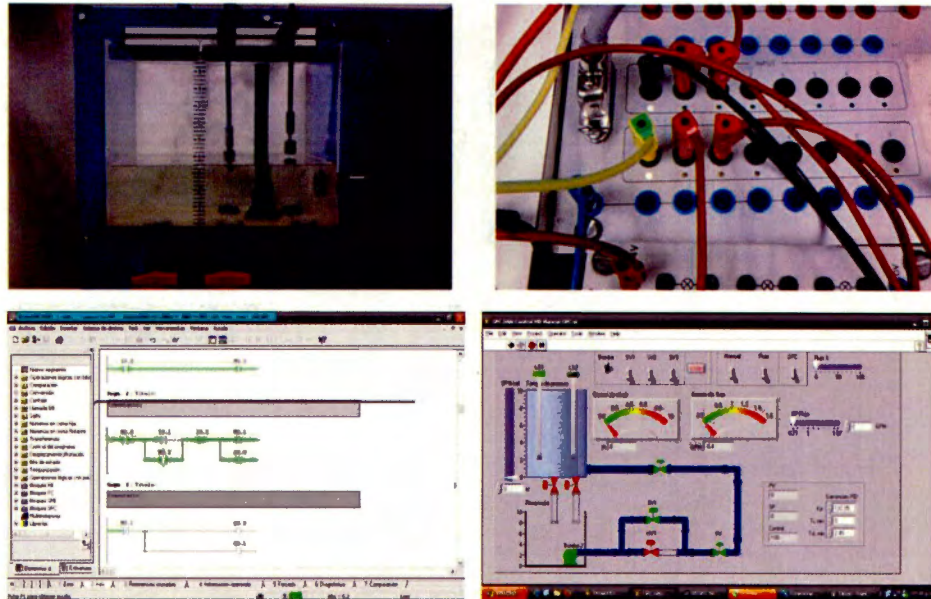


Figura 7.4 Verificación monitoreo de llenado por OPC

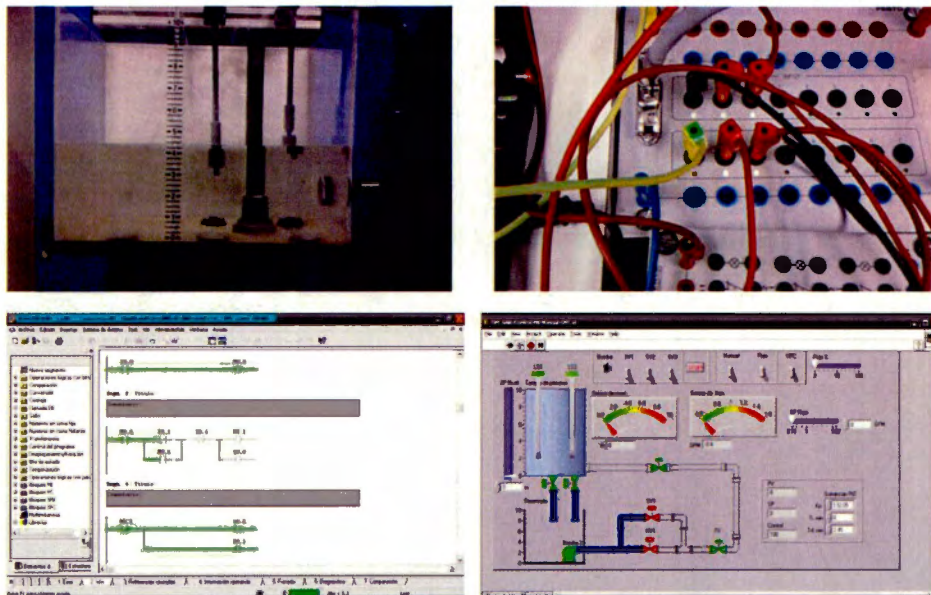


Figura 7.5 Verificación monitoreo de vaciado por OPC

El servidor OPC con el que se contó fue la versión de evaluación de NI OPC Servers. La versión de evaluación restringe la operación del servidor, manteniendo el canal de comunicación por un periodo máximo de dos horas. Otra de las restricciones impuestas

por National Instruments es que las variables configuradas en el servidor solo pueden ser monitoreadas, impidiendo que las variables del PLC puedan ser modificadas.

Un objetivo muy importante el cual se logró, fue realizar un manual de prácticas para el Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552, el cual se puede estudiar en la primera parte de la sección de Anexo. La primera práctica se llama Conceptos Básicos, en la cual se abordan los conceptos básicos, componentes del sistema y una de las conexiones básicas. La segunda práctica se trata de la caracterización de sensores y actuadores, aquí se explica a detalle la calibración de los distintos elementos del T5552. La tercera práctica pone en acción la configuración on-off por medio de los relevadores que contiene el Amatrol, también explica el diagrama necesario para poder utilizarse por medio del PLC. La última práctica explica cómo usar la tarjeta de adquisición de datos en comunicación con LabVIEW para realizar el control de flujo y de nivel.

Capítulo 8 Trabajo a Futuro

El PLC con el que se trabajó tiene muchas ventajas. Una de ellas es que posee cinco tipos de reguladores PID. No se pudo realizar el completo funcionamiento del PLC por problemas con el monitoreo de las variables internas. Esta es la razón por lo que se propone trabajar en esta sección en un futuro.

Existen diferentes algoritmos de control avanzado como el control cascada o el control difuso. Estos tipos de control pueden ser comparados unos contra otros y determinar cuál es el mejor para el Sistema de Control de Procesos del Amatrol T5552 en el caso de los controles de nivel y de flujo. También se puede simular el proceso completo y comprobar la fidelidad de los modelos contra el sistema real.

Se propone que como trabajo a futuro utiliza la pantalla multipanel de Simens, la cual tendrá como objetivo complementar visualmente los sistemas de control de flujo y de nivel.


Existen varias limitantes en la versión de evaluación de NI OPC Servers, por lo que se considera conveniente comprar toda la licencia para este segmento.

El proceso que realiza el T5552 no puede ser más rápido por las restricciones físicas. En este caso si se desea tener un mayor gasto, se necesita adquirir una bomba la cual se pueda controlar.

Capítulo 9 Anexos

9.1 Prácticas

9.1.1 Práctica 1 Conceptos Básicos

 <p>TECNOLÓGICO DE MONTERREY.</p> <p>Campus Ciudad de México División de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Electrónica y Mecánica</p>	Materia:	
	Profesor:	
	Práctica No. 1	
	Fecha:	
	Equipo No.	
	Matrículas:	
	Calificación:	

Conceptos Básicos

1. Objetivo

El alumno al finalizar esta práctica será capaz de:

- Conocer los conceptos básicos y sus componentes de un sistema de control.
- Conocer e identificar los componentes del Sistema AMATROL T5552
- Realizar una conexión básica en el Sistema AMATROL T5552, en la cual el alumno interactúe con el sistema.

2. Conceptos Teóricos

Un sistema de control de procesos involucra, normalmente, el control de materiales líquidos o gaseosos. Un claro ejemplo es el control de nivel en un tanque, como se muestra en la *Figura 2.1*. El objetivo principal es mantener el nivel del líquido constante. Para poder obtener este resultado, es necesario que el líquido expulsado del tanque sea regulado por una válvula. Este sistema está conformado por el sensor de nivel de líquido, la válvula y el controlador.

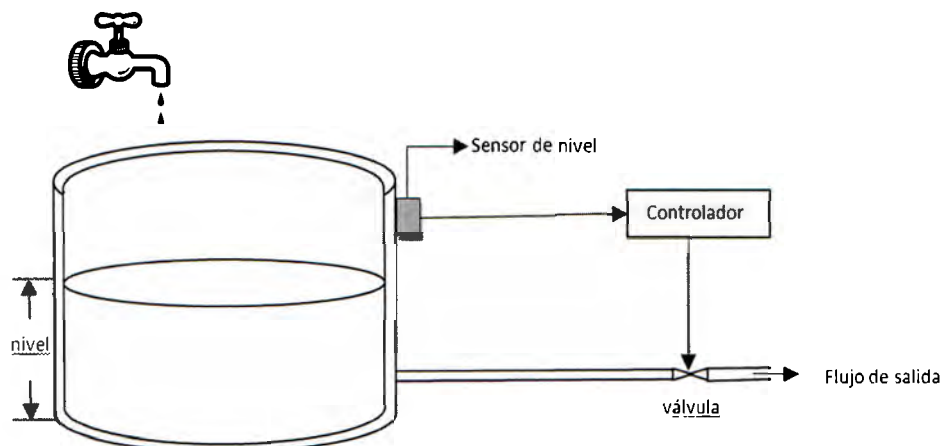


Figura 2.1 Sistema de control de nivel de un líquido

Para el claro entendimiento de la operación del sistema de control de procesos, es necesario entender los tres términos básicos que son usados para describir una operación: variable de proceso, setpoint y error.

- Variable de proceso (VP).- Ésta es la variable física del proceso que se quiere controlar.
- Setpoint, punto de ajuste o punto de consigna (SP).- Es el valor deseado en la variable de proceso.
- Error.- Es la diferencia entre la variable de proceso y el Setpoint. $\text{Error} = \text{SP} - \text{VP}$.

Un sistema de control de procesos puede ser diseñado para controlar muchos tipos de variables de proceso; las principales son: flujo, nivel, presión y temperatura.

Existen dos tipos de variables de proceso la manipulada y la controlada. La primera es la cantidad o condición que se mide y controla. La segunda es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Usualmente, la variable controlada es la salida del sistema. El objetivo de controlar es medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir la desviación del valor medido respecto del valor deseado. (Ogata, 2003)

En el diagrama del ejemplo *Figura 2.2*, la variable controlada es el nivel de líquido. La variable manipulada es el flujo de salida del tanque; este flujo es regulado por la posición de la válvula de control.

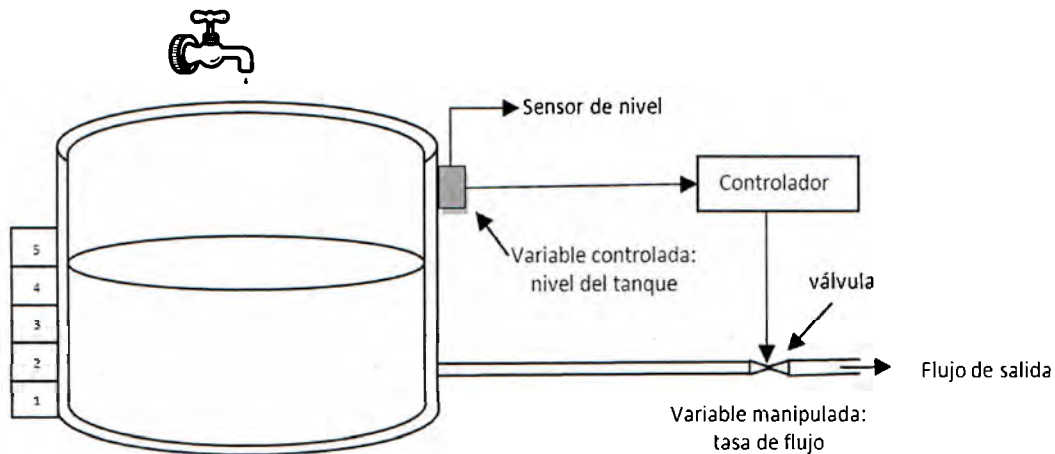


Figura 2.2 Control de nivel por medio de la variable manipulada de flujo

La entrada principal al sistema de control es el valor requerido de la variable ($r(t)$ o SP), y la salida es el valor real de la variable ($v(t)$ o VP). Esto se puede observar en la *Figura 2.3* con un sistema de control de lazo cerrado, en la *Tabla 2.1* se puede observar cada una de las variables con su nomenclatura respectiva. Una característica necesaria del sistema de control en lazo cerrado es el lazo de realimentación. Este es el medio a través del cual una señal relacionada con la variable real obtenida se realimenta para compararse con la señal de referencia.

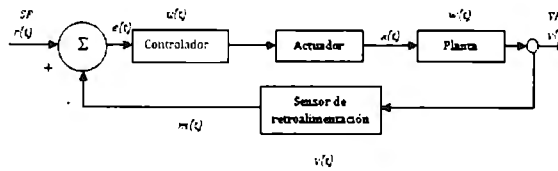


Figura 2.3 Sistema de control en lazo cerrado

Nomenclatura	
r	Señal de referencia o Setpoint
u	señal de control
x	variable manipulada o señal de entrada a la planta o proceso
y	salida de la planta o variable de proceso
m	salida de medición de la salida de la planta
e = r - m	error del sistema
w	perturbación de la planta
v	perturbación en la medición

Tabla 2.1 Nomenclatura de Sistema de control en lazo cerrado

3. Desarrollo

3.1. En los siguientes ejercicios determinar la variable controlada, calor de referencia, elemento de comparación, señal de error, elemento de control, elemento de corrección, proceso, dispositivo de medición y realimentación según los parámetros y acciones del problema.

3.1.1. Ejercicio 1

En la *Figura 3.1* se muestra un sistema de control automático sencillo para la velocidad angular de un eje. Un potenciómetro fija el valor de referencia, esto se realiza a partir de un voltaje aplicado al amplificador diferencial como valor de referencia para la velocidad angular requerida. El amplificador diferencial se usa para comparar y para amplificar la diferencia entre los valores de referencia y realimentación, amplificando la señal de error. Después la señal de error amplificada se aplica al motor que, a su vez, ajusta la velocidad del eje giratorio. La velocidad angular del eje se mide con un tacogenerador, conectado al eje por medio de un par de engranes cónicos. La señal que viene del tacogenerador se realimenta al amplificador diferencial. (Bolton, 2001)

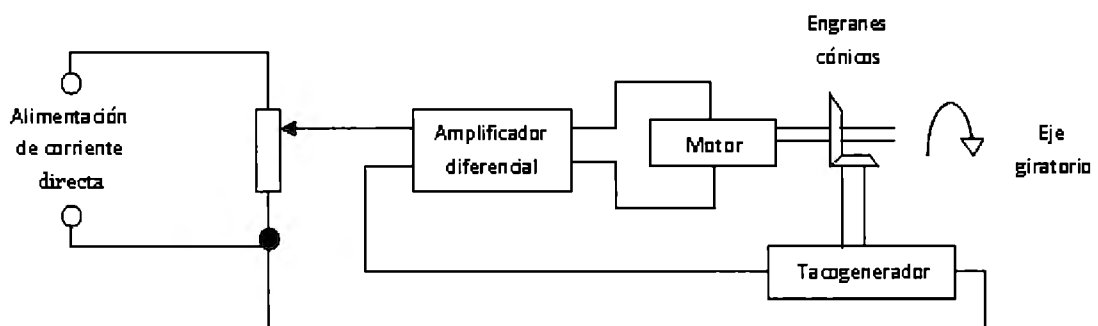


Figura 3.1 Sistema de control automático de la velocidad angular de un eje

Determina las siguientes variables	
Variable controlada	<i>Velocidad angular del eje</i>
Valor de referencia	<i>Voltaje especificado para la velocidad requerida</i>
Elemento de comparación	<i>Amplificador diferencial</i>
Señal de error	<i>Diferencia entre el voltaje del valor de referencia y el voltaje de realimentación</i>
Elemento de control	<i>Amplificador</i>
Elemento de corrección	<i>Motor</i>
Proceso	<i>Eje giratorio</i>
Dispositivo de medición	<i>Tacogenerador</i>
Realimentación	<i>Negativa</i>

3.1.2. Ejercicio 2

No sólo en la industria se encuentran aplicaciones de control con realimentación, sino que también en se encuentran en la vida diaria con acciones rutinarias como el levantar una taza de café de la mesa. Para levantar la taza, la manodebe moverse al lugar correcto, esquivar los obstáculos del camino y posesionarse adecuadamente para un buen agarre del asa. Para controlar la mano se necesita de la realimentación de la visión y del tacto. Determinar las siguientes variables para el sistema de control de mover la mano a la taza.(Bolton, 2001)

Determina las siguientes variables	
Variable controlada	<i>Ubicación de la mano en relación a la taza</i>
Valor de referencia	<i>Ubicación de la asa</i>
Elemento de comparación	<i>La persona</i>
Señal de error	<i>Diferencia entre las ubicaciones real y requerida de la mano</i>
Elemento de control	<i>La persona</i>
Elemento de corrección	<i>El brazo y la muñeca</i>
Proceso	<i>Dinámica de la mano</i>
Dispositivo de medición	<i>Observación visual</i>
Realimentación	<i>Negativa</i>

3.2. Identificar los componentes del Sistema de control de Procesos del AMATROL T5552

A continuación, se presentan los distintos componentes del Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552 y su ubicación física en el panel de control, así como una breve explicación y observaciones pertinentes.

Dentro de la industria de control y automatización de procesos existe el estándar ISA el cual tiene como objetivo establecer la nomenclatura de los componentes que integran un sistema de control. Este estándar se creó por la necesidad de las industrias de tener un catalogo de símbolos el cual fuera universal. El campo de este *protocolo* es muy amplio, industrias como la química o petrolera lo usan. En el Apéndice 1 de esta práctica se muestra los símbolos de diferentes elementos. Es necesario que se estudien y comprendan para que no existan problemas en diagramas futuros del AMATROL.

En la *Figura 3.2* se observa el sistema de control de procesos AMATROL. Las válvulas naranjas son manuales, mientras que las verdes son solenoides. En la *Figura 3.3* se observa el esquema del sistema de control de

Procesos AMATROL, el número mostrado en esta figura hace referencia a la Tabla 3.1, la cual contiene la descripción del elemento.

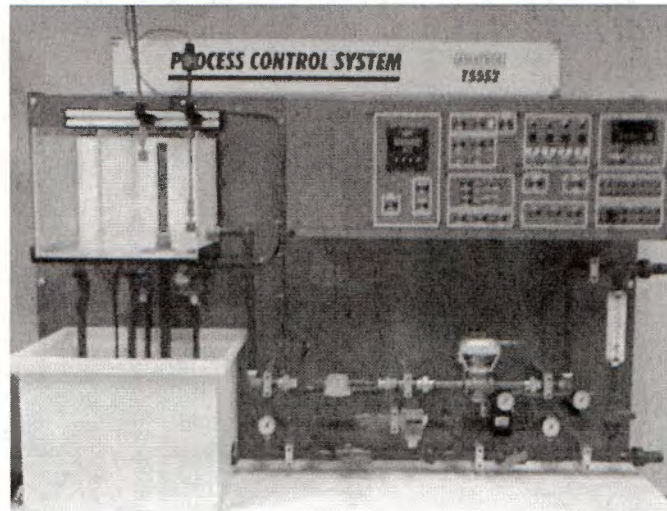


Figura 3.2 Fotografía de Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552

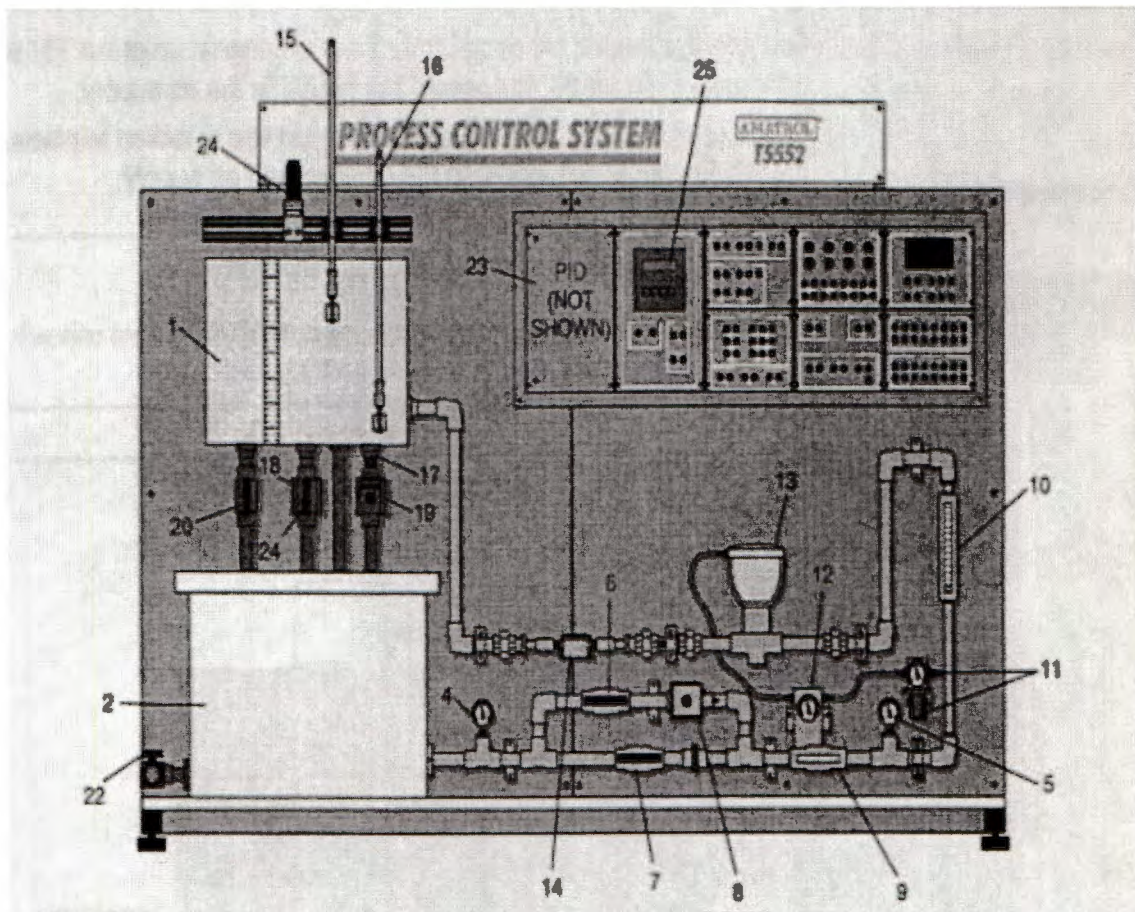


Figura 3.3 Esquema del Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552

Elemento	Descripción	Observaciones	Referencia
1	Tanque de proceso	Tanque donde la red de tuberías tiene su fin. Es el punto donde el nivel de líquido es monitoreado por medio de sensores. Es el punto donde todo el proceso toma lugar. El agua es regresada al tanque de depósito por medio de válvulas.	-
2	Tanque de depósito	El proceso de fluido inicia en esta parte, donde al agua esta almacenada.	-
3	Bomba	Localizada en el interior del tanque de depósito, es del tipo centrífuga. La bomba extrae el agua del tanque y lo traslada a la red de tuberías. El agua ayuda a regular la temperatura de la bomba y por tanto previene de un sobrecalentamiento. Para que no exista ningún problema con esto, <i>el tanque de depósito debe ser llenado hasta 4 pulgadas antes del borde superior.</i>	-
6	Válvula Manual	Restringe el flujo a través de su respectiva tubería	HV 100-A
7	Válvula Manual	Restringe el flujo a través de su respectiva tubería	HV 100-B
8	Válvula Solenoide	Restringe el flujo de la tubería secundaria.	SV 100-A
9	Válvula manual de control de flujo	La válvula FV 100 es dosificadora y es la principal controladora manual de flujo a la red de tuberías. La escala precisa de 180° permiten un ajuste exacto del proceso de dosificación. [Georg Fischer S.A, 2009]	FV 100
10	Medidor de flujo	Tipo rotámetro, el cual provee una identificación visual de la tasa de flujo a través del sistema.	FI 100
11	Regulador de presión con medidor	Controla la fuente de aire que es enviada al convertidor I/P.	PC100 PI 100-C
12	Convertidor de corriente a presión	Es un acondicionador de señal, que convierte una señal eléctrica de un controlador a una señal neumática para controlar la válvula neumática. Tiene una corriente de entrada nominal de 4 a 20 mA, mientras que la salida de presión es de 3 a 15 psi.	IYT-100
13	Válvula neumática de diafragma	Válvula de control de flujo que puede ser de agua, vapor o gas.	FCV 100
15	Interruptores de nivel tipo flotante 1	Se extienden a través de tanque de proceso. Esto da la ventaja de no sólo tener un sensor de nivel, sino también "sensores" flotantes que indican cuándo el nivel de agua ha llegado a un punto fijado por su posición.	LSH 200-A
16	Interruptores de nivel tipo flotante 2	Se extienden a través de tanque de proceso. Esto da la ventaja de no sólo tener un sensor de nivel, sino también "sensores" flotantes que indican cuándo el nivel de agua ha llegado a un punto fijado por su posición.	LSH 200-B

18	Válvula solenoide	Drenado del tanque de proceso.	SV 100-B
19	Válvula solenoide	Drenado del tanque de proceso.	SV 100-C
20	Válvula manual	Drenan el tanque de proceso	HV 300
21	Válvula manual	Drenan el tanque de proceso	HV 100-C
22	Válvula manual	Drena el tanque de depósito	HV 400
25	Transmisor de flujo	Es un instrumento que se interconecta con el transductor que está acoplado a la tubería. El transmisor tiene la capacidad no sólo de medir el flujo en galones por minuto, sino también en Amperes, también lleva un registro de la cantidad de galones que se han procesado desde el momento del encendido, haciendo las veces de un totalizador. Al llegar a un valor definido por el usuario, da la opción de control de relevador pudiendo incluso indicar los segundos en los que el colector estará abierto o cerrado.	FIT 100

Tabla 3.1. Enumeración de los elementos del sistema

3.3. Realizar el control del nivel de líquido en el tanque

En este procedimiento se controlará el nivel del tanque de proceso ajustando manualmente la válvula de control de flujo. Durante este proceso se observarán como los cambios en el proceso afectan la salida.

- A Observar que el tanque de depósito este lleno hasta 4 pulgadas debajo del borde superior. En la *Figura 3.4* se observa que el tanque posee una marca donde se encuentran las 4 pulgadas, se puede llenar un poco más de la referencia, pero no menos.

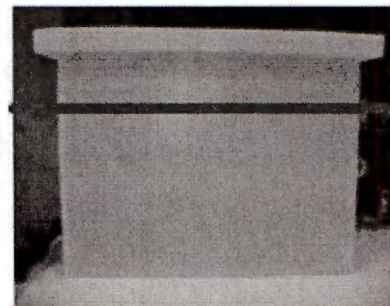


Figura 3.4 Tanque de depósito

- B Asegurarse que la válvula de drenado se encuentra cerrada y la tapa de drenado en su posición de cerrado, como se muestra en la *Figura 3.5*.

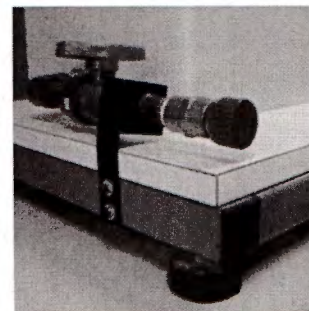


Figura 3.5 Válvula de drenado y tapa de drenado

- C Realizar la conexión que se muestra en la *Figura 3.6* en el panel de control. Se usará un switch para empezar la circulación de la bomba.

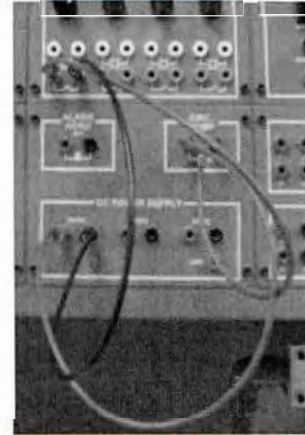


Figura 3.6 Conexión básica

- D Observar que el switch SS1 es en la posición OFF como se muestra en la *Figura 3.7*.



Figura 3.7 Posición OFF de switch

- E Asegurarse que las dos válvulas manuales (HV 300, HV 100-C) debajo del tanque de proceso, se encuentran cerradas.

- F Asegurarse que la válvula manual de control de flujo (FV 100) esté completamente cerrada como se muestra en la *Figura 3.8*.

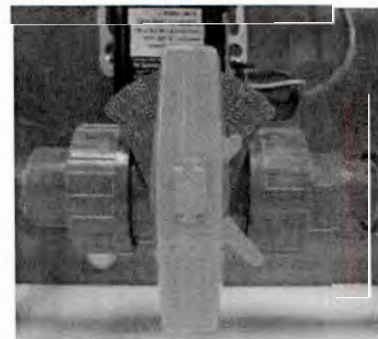


Figura 3.8 Cerrado de válvula manual de control de flujo

- G Asegurarse que el cable de alimentación de la T5552 está conectado al enchufe. El indicador de luz deberá estar encendido, como se muestra en la *Figura 3.9*. Encender el Sistema de Control de Procesos Amatrol T5552.



Figura 3.9 Indicador de encendido

- H Colocar el interruptor en posición de encendido como se muestra en la *Figura 3.10*, para que la bomba empieza a hacer la circulación en la red de tuberías, aunque no debe haber flujo ya que la válvula manual de control de flujo está cerrada.



Figura 3.10 Posición ON de switch

- I Abrir la válvula manual de control de flujo, hasta que el medidor de flujo este alrededor de .8 galones por minuto, como se muestra en la *Figura 3.11*. El agua deberá empezar a caer en el tanque de proceso.

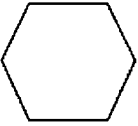
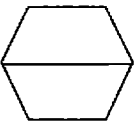
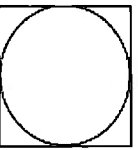


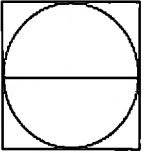
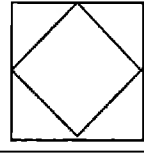
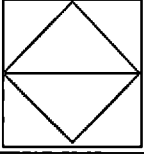
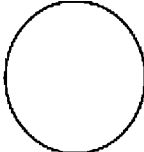
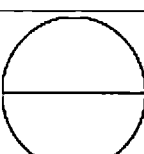
Figura 3.11 Medidor de flujo a .8 galones por minuto

- J Cuando el nivel de agua, en el tanque de proceso, esté a 5 pulgadas, abrir a la mitad la válvula manual derecha. Esto permitirá al tanque de proceso drenarse.
- K Aumenta el flujo en el tanque de proceso ajustando la válvula manual de control de flujo hasta que el nivel de líquido llegue hasta 5 pulgadas.
- L Para demostrar el efecto de disturbio, cerrar la válvula de drenado aproximadamente $\frac{1}{4}$ de vuelta. Se debe observar un incremento en el tanque de proceso. Esto es un ejemplo de control en lazo abierto.
- M Ajustar la tasa de flujo usando la válvula manual de control de flujo (FV 100) para que el nivel se estabilice en 5 pulgadas. Se debe observar que el nivel del líquido se haya incrementando aproximadamente al nivel deseado, de esta manera se está actuando como el componente de retroalimentación en el proceso. Con esto, se convierte en un control de lazo cerrado.
- N Fin de la práctica


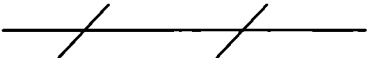
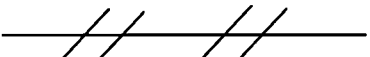
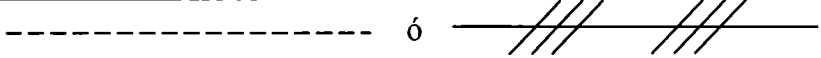
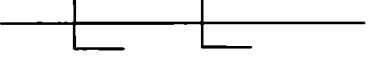
4. Apéndice

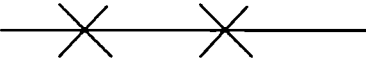


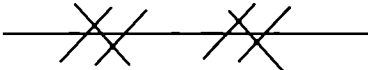
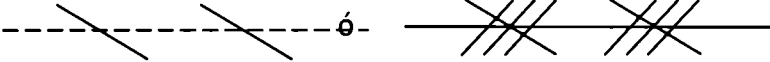
Símbolos de control, Señales y Letras. Basado en el estándar ISA-5.1-1984 (R1992) de la Sociedad Internacional de Automatización, ISA (ISA, 1992)

	Función de ordenador en el campo
	Función de ordenador sobre el panel de control y detrás del panel de control.
	Control/despliegue compartido en el campo

	Control/despliegue compartido sobre el panel de control y detrás del panel de control.
	Controlador lógico programable en el campo
	Controlador lógico programable sobre el panel de control y detrás del panel de control.
	Instrumento discreto en el campo/ Medición
	Instrumento discreto sobre el panel de control y detrás del panel de control.

Símbolos de Instrumentos Línea

Instrumento de Suministro o Conexión a proceso	
Señal Indefinida	
Señal Neumática	
Señal Eléctrica	
Señal Hidráulica	

Tubo Capilar	
Sistema de Enlace Interno (Software o Datos de Enlace)	
Enlace Mecánico	
Señal Binaria Neumática	
Señal Binaria Eléctrica	

5. Referencias

Bolton, W. (2001). Ingeniería de Control. En B. W, *2da edición* (pág. 12). México DF: Alfaomega.


Ogata, K. (2003). En O. Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderna* (pág. 2). Madrid, España: Prentice Hall.

Georg Fischer S.A (2009). Hoja de especificaciones de la válvula proporcional. Recuperado el 2 de marzo de 2009. Web site:

<http://www.georgfischer.es/go/268D57D1D60EB5F06FA327456909A42F/>

ISA. (1992). Instrumentation Symbols and Identification, ISA-5.1-1984 (R1992). Triangle Park Park, NC, USA: ISA.

9.1.2 Práctica 2 Caracterización de sensores y actuadores

 <p>TECNOLÓGICO DE MONTERREY</p> <p>Campus Ciudad de México División de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Electrónica y Mecánica</p>	Materia:	
	Profesor:	
	Práctica No. 2	
	Fecha:	
	Equipo No.	
	Matrículas:	
	Calificación:	

Caracterización de sensores y actuadores

1. Objetivo

El alumno comprenderá la correcta conexión de los componentes del Amatrol T5552, así como la caracterización y calibración del convertidor I/P, la válvula neumática y el sensor de nivel.

2. Introducción

2.1. Convertidor I/P.

Un convertidor I/P es un acondicionador de señal que recibe una señal analógica eléctrica y la convierte en una señal analógica neumática. Estos convertidores son utilizados comúnmente como una interfaz entre un controlador electrónico y una válvula neumática de diafragma. En el caso particular del convertidor ubicado en nuestro sistema, la conversión se realiza de una señal eléctrica de 4-20 mA a una señal neumática de 3-15 psi que se conecta directo a la válvula.

2.2. Válvula neumática.

Las válvulas proporcionales controlan un fluido mediante su apertura que es proporcional a la señal de entrada que recibe. Las válvulas proporcionales más utilizadas son las de actuador de diafragma y las de actuador eléctrico. Las válvulas neumáticas de diafragma son más utilizadas que las electro válvulas ya que las primeras son más económicas, normalmente son más rápidas y seguras, sobre todo si el fluido procesado es inflamable.

2.3. Sensor de nivel.

La variedad de sensores para medir niveles es grande. El tipo de sensor depende de la aplicación. Cuatro de los tipos de sensores de nivel más utilizados son: de presión, de resistencia eléctrica, de capacitancia eléctrica y ultrasónicos. El sensor utilizado en el Amatrol T5552 es un sensor de tipo presión. Los sensores de nivel de tipo presión miden el nivel indirectamente midiendo directamente la presión del líquido existente en el fondo del contenedor. Esta presión es convertida a una señal eléctrica analógica por medio de una variación capacitiva. Por otra parte un sensor ultrasónico de distancia mide empleando un transductor que emite "paquetes" de ultrasonido que contienen una serie de ondas sonoras intermitentes. El paquete se emite en forma cónica, se rebota o refleja en la superficie objetivo y se recibe e regreso en un transductor. El tiempo requerido por el sonido para ir y volver se mide y se convierte a unidades de distancia. Varios factores afectan la medición con ultrasonido: la naturaleza de la superficie, el ángulo del cono y la distancia

el sensor objetivo. Las condiciones ambientales como son temperatura, humedad relativa, gases, vapores y la presión también afectan.

3. Equipo y material

El material requerido para realizar esta práctica es el siguiente:

- Multímetro Fluke 179
- Potenciómetro de 1 k Ω
- Cables caimán – caimán.
- Cables banana – caimán.
- Fuente de alimentación triple Tektronix PS280.

4. Desarrollo

4.1. Convertidor I/P IYT 100

El convertidor I/P IYT 100 del sistema acepta una señal eléctrica de entrada que va de los 4 a los 20 mA entregando a su vez una señal neumática de salida de 3 a 15 psi. La relación entre la salida y la entrada es lineal.

La entrada eléctrica energiza una bobina alrededor de un imán, esto provoca un campo magnético que empuja una aleta metálica hacia la salida de escape de la entrada de presión. Mientras menor sea el escape de presión, mayor será la acción sobre el vástago que permite la salida de presión por la salida del convertidor, esto se entiende con mayor claridad al examinar la Figura 4.1.

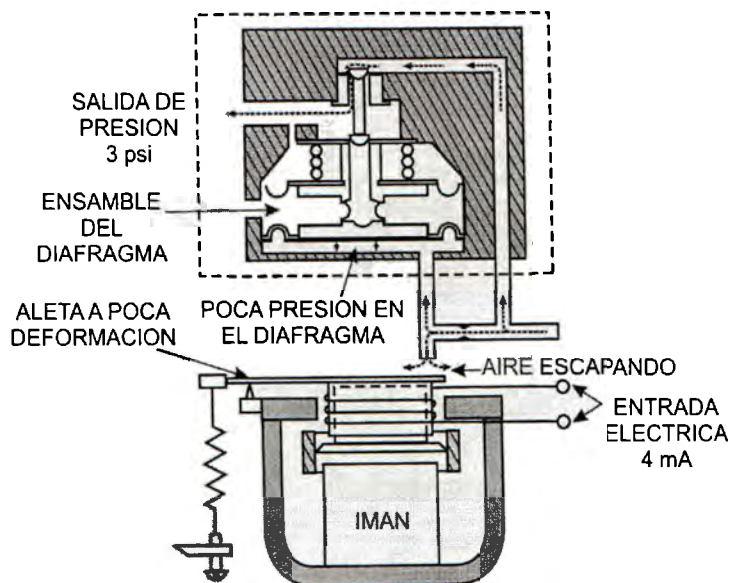


Figura 4.1 Diagrama interno del convertido I/P

4.1.1. Operación

Antes de proceder a la conexión el alumno deberá ajustar el voltaje de la fuente de alimentación a 4 volts y deberá de revisar entre cuales terminales del potenciómetro se alcanza 1 k Ω . Se realizará la conexión de acuerdo a la Figura 4.2. Es de suma importancia que el multímetro se encuentre tomando lecturas en DC de lo contrario la caracterización estará mal realizada.

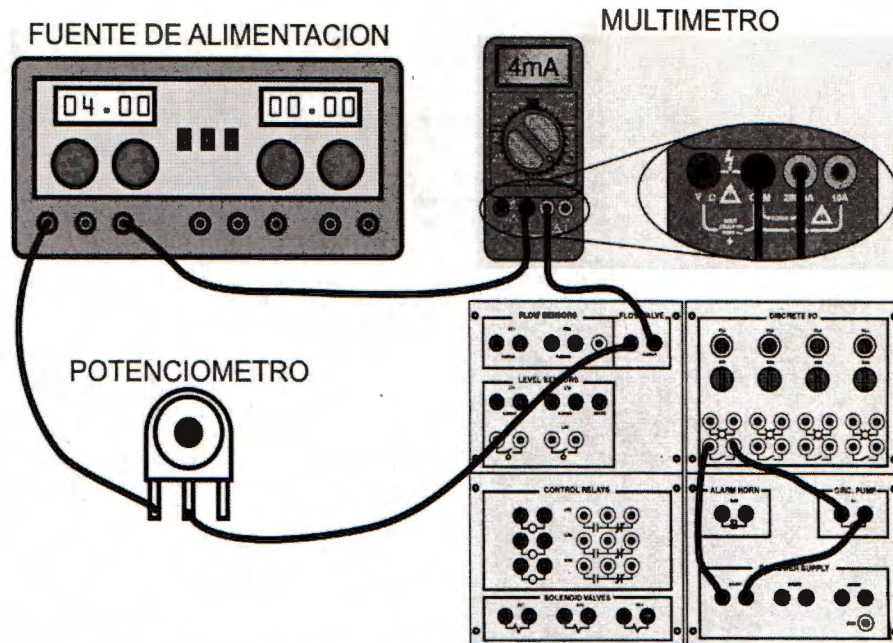


Figura 4.2 Diagrama de conexión para la operación del convertidor I/P

Una vez hecha la conexión se regulará la fuente hasta que en el multímetro se lean exactamente 4 mA. Se deberá de conectar la manguera de alimentación de aire del sistema neumático del Amatrol T5552 y abrir el regulador de aire PC 100 hasta que el medidor de presión marque 20 psi.

4.1.2. Calibración

Al suministrar al convertidor I/P con 4 mA el medidor de presión del mismo convertidor deberá de indicar 3 psi, de no ser así se deberá ajustar el tornillo de ajuste de cero (zero adjust) hasta que la aguja indique 3 psi. Se procederá a regular la corriente de alimentación, ya sea por medio del potenciómetro o de la fuente de voltaje, hasta que en el multímetro se lean 20 mA. Con esta alimentación de corriente el medidor de presión del convertidor I/P deberá indicar 15 psi, de no ser así se deberá de ajustar el tornillo de ajuste de rango (span adjust), removiendo la goma de protección, hasta que la aguja indique 15 psi.

Para identificar los tornillos de ajuste refiérase a la Figura 4.3.

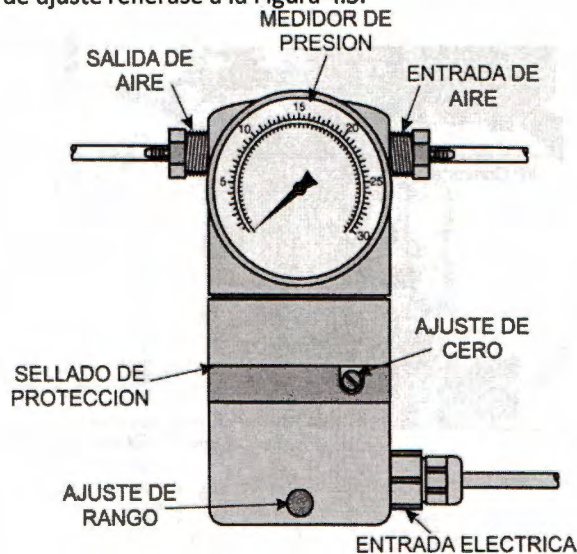


Figura 4.3 Convertido I/P IYT 100

4.1.3. Caracterización

Una vez calibrado el convertidor I/P se registrarán 10 lecturas tanto del multímetro como del medidor de presión del convertidor I/P llenando así una tabla con la cual se procederá a graficar la presión contra corriente. La relación entre las variables debe de ser completamente lineal.

4.2. Válvula neumática FCV 100

Una válvula proporcional de diafragma utiliza presión neumática para abrir o cerrar la válvula proporcionalmente a la presión de aire con que se alimenta. Estas válvulas consisten de tres partes principales: un actuador de diafragma, un yugo y el cuerpo de la válvula.

El actuador de diafragma consiste en un diafragma comúnmente de goma sintética o acero inoxidable, que se flexiona de acuerdo a la presión recibida, un resorte calibrable que se opone al movimiento del diafragma y un vástago que se mueve hacia arriba o hacia abajo dependiente del movimiento del diafragma

El yugo es una abrazadera, normalmente hecho de metal, que une el actuador de diafragma con el cuerpo de la válvula.

El cuerpo de la válvula incluye el acople de cierre, el asiento de la válvula y las tomas de entrada y salida. El acople se mueve hacia arriba y hacia abajo para controlar el flujo. Cuando la válvula está completamente cerrada, el acople descansa completamente en el asiento. El flujo entra y sale por las tomas.

Cuando el diafragma no recibe la suficiente presión de aire para contrarrestar la compresión del resorte, el vástago junto con el acople de cierre son llevados hacia arriba permitiendo que el flujo que atraviesa por la válvula sea mayor. El efecto contrario ocurre con una presión de aire mayor.

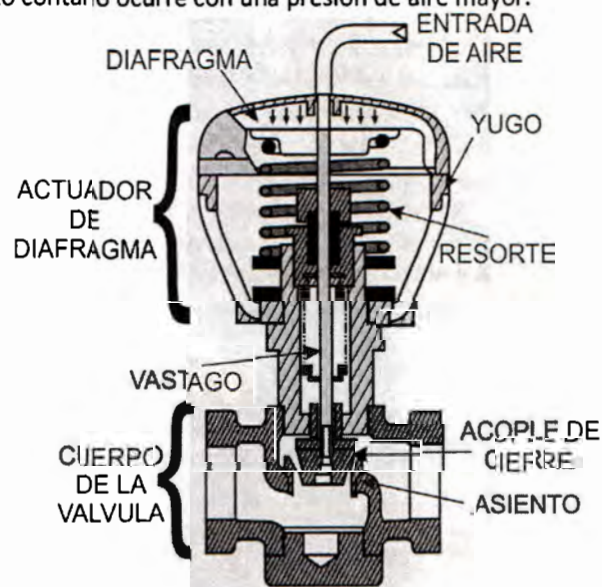


Figura 4.4 Diagrama interno de la válvula neumática

4.2.1. Operación

Antes de proceder a la conexión el alumno deberá ajustar el voltaje de la fuente de alimentación a 4 volts y deberá de revisar entre que terminales del potenciómetro se alcanza 1 k Ω . Se realizará la conexión de acuerdo a la Figura 4.5. Es de suma importancia que el multímetro se encuentre tomando lecturas en DC de lo contrario la caracterización estará mal realizada.

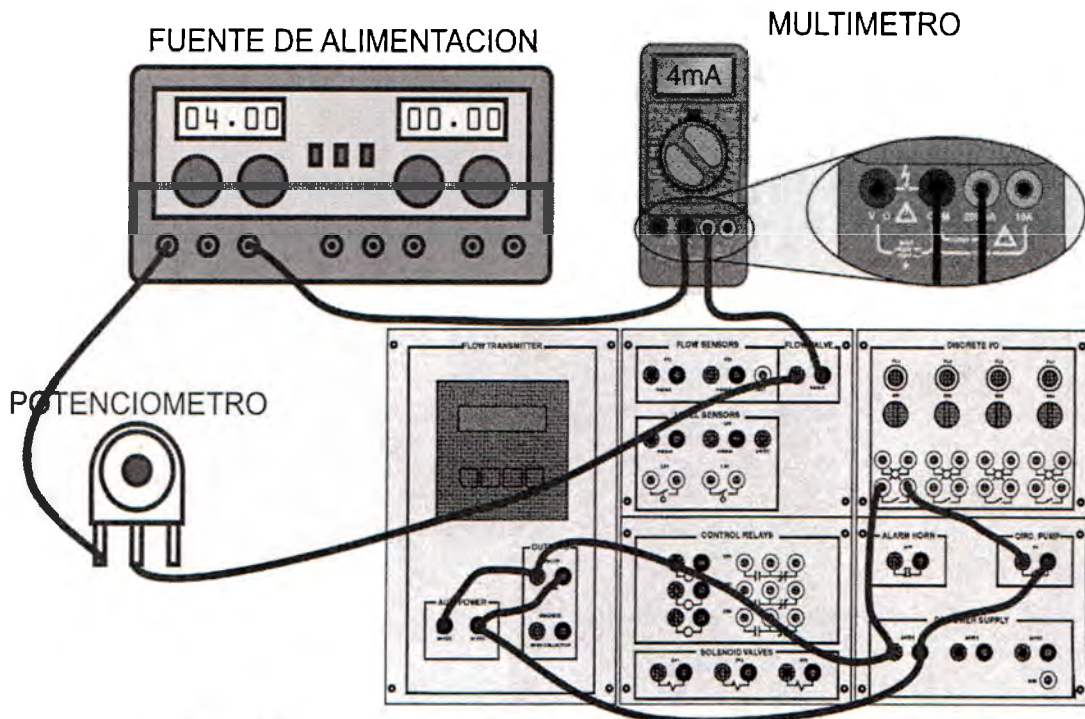


Figura 4.5 Diagrama de conexión para la operación de la válvula neumática

Una vez hecha la conexión, se regulará la fuente hasta que en el multímetro se lean exactamente 4 mA. Se deberá de conectar la manguera de alimentación de aire del sistema neumático del Amatrol T5552 y abrir el regulador de aire PC 100 hasta que el medidor de presión marque 20 psi.

4.2.2. Calibración

El equilibrio de fuerzas entre la compresión del resorte y la presión de aire en el diafragma de la válvula es muy sensible, por lo que debe de poner especial atención al momento de calibrar la válvula.

Encienda la bomba de agua por medio del interruptor SS1

Con la presión de aire al mínimo, esto es la corriente aplicada al convertidor I/P de 4 mA, en el transmisor flujo deberá de indicar un rango de entre 1.40 y 1.60 GPM.

Se procederá a regular la corriente de alimentación, ya sea por medio del potenciómetro o de la fuente de voltaje, hasta que en el multímetro se lean 20 mA. Con esta corriente se le suministrará a la válvula una presión de aire de 15 psi con lo que en el transmisor de flujo se tendrá una lectura de entre 0.55 a 0.65 GPM.

De no ser así se deberá apagar la bomba por medio del interruptor SS1. Se deberá de desconectar la manguera de alimentación de aire del sistema.

Con ayuda de una llave de 1/4 de pulgada se deberá de ajustar el engrane de calibración, mostrado en la Figura 4.6, de la siguiente manera: si el flujo fue menor a 0.55 GPM se deberá de girar ligeramente hacia la derecha, es decir en contra de las manecillas del reloj. Este giro incrementará la presión del resorte sobre el diafragma lo que permitirá un mayor flujo de agua por la válvula; en cambio si el flujo fue mayor a 0.65 GPM se deberá de girar ligeramente hacia la izquierda, esta es a favor de las manecillas del reloj. Este giro tendrá un efecto opuesto al anterior.

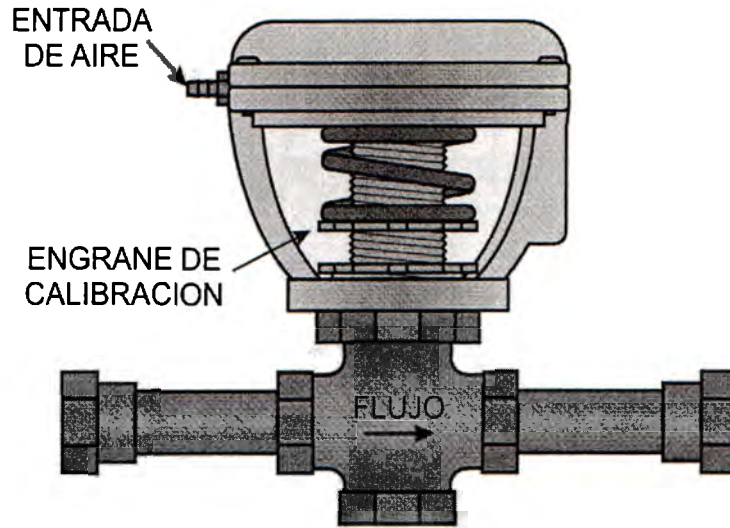


Figura 4.6 Engrane de calibración de la válvula neumática

Una vez hecho esto, se reconectará nuevamente la manguera de alimentación de aire al sistema abriendo el regulador de aire PC 100 hasta los 20 psi. Se encenderá la bomba de agua por medio del selector SS1 y se tomará la medida del transmisor de flujo.

De no haberse establecido el flujo entre los niveles de 0.55 a 0.65 GPM se deberá de repetir los procesos de apagado, desconexión, ajuste, re-conexión y encendido explicados en los tres pasos anteriores.

4.2.3. Caracterización

Haber calibrado la válvula para que su máximo cierre permita un flujo de entre 0.55 y 0.65 GPM es importante para su caracterización. Cuando la compresión del resorte no es suficiente la característica no lineal isoporcentual de la válvula se pierde pudiendo dar como resultado el siguiente comportamiento.

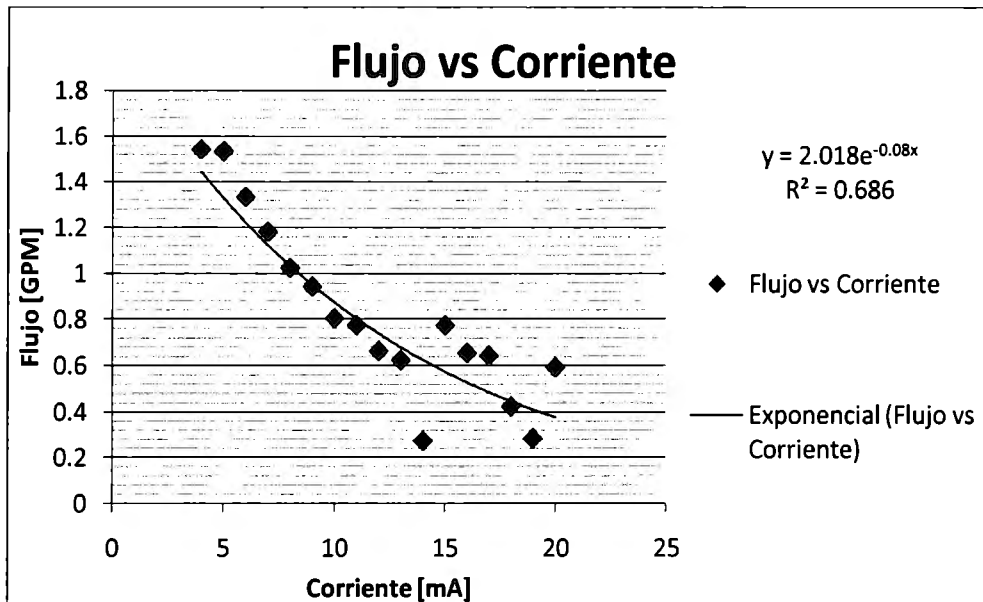


Figura 4.7 Relación de flujo contra corriente de la válvula neumática

Una vez calibrada la válvula, se registrarán 10 lecturas tanto del multímetro como del transmisor de flujo llenando con estos valores una tabla con la cual se procederá a graficar la presión contra corriente. La relación entre las variables deberá de presentar una relación exponencial decreciente cuyo coeficiente de correlación (R^2) deberá acercarse a la unidad.

4.3. Sensor capacitivo de nivel LET 200-A

Estos sensores utilizan un cambio en la capacitancia para crear una salida eléctrica que es proporcional a la presión. Como se explica claramente en la Figura 4.8, un sensor de presión de capacitancia variable contiene un electrodo estacionario y un diafragma flexible, normalmente fabricado de acero inoxidable. Juntos forman un capacitor que hace las veces de transductor en el capacitor. Este ensamble se conecta a una circuitería electrónica que actúa como transmisor.

Cuando la presión del fluido actúa sobre el diafragma, su flexión causa un cambio en la capacitancia. Para detectar el cambio de esa capacitancia, este sensor utiliza dos circuitos osciladores uno conectado a una capacitancia fija y el otro conectado a la capacitancia creada por el diafragma. Cuando la presión se incrementa, la frecuencia del circuito oscilador conectado al diafragma cambia. Un circuito extra compara la diferencia de la frecuencia de ambos osciladores y produce una señal analógica de salida de 4 a 20 mA.

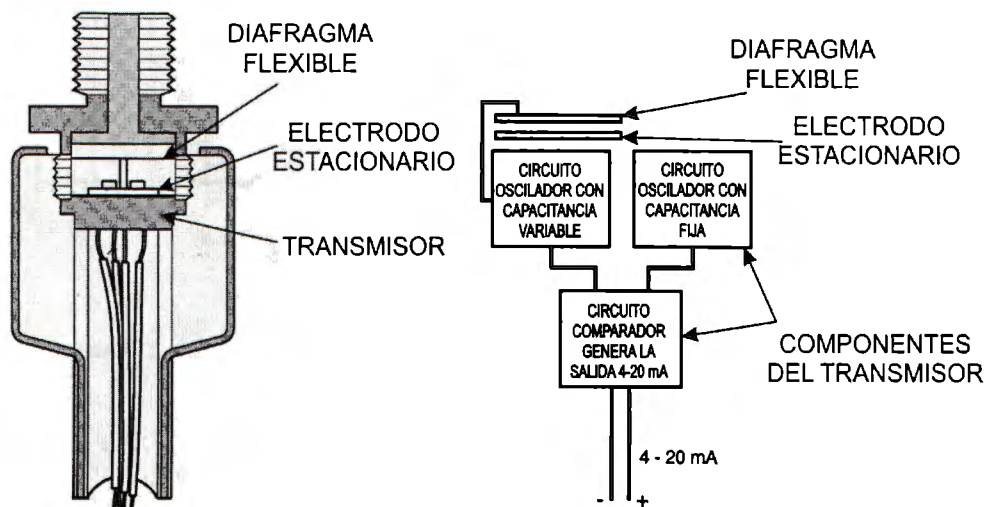


Figura 4.8 Diagrama interno y de operación del sensor de presión capacitivo.

4.3.1. Operación

Antes de comenzar con la operación del sistema, el alumno deberá de cerciorarse que haya suficiente agua en el tanque de depósito para el nivel en este sobrepase por mucho la marca de las 4 pulgadas. También deberá de asegurarse que las válvulas manuales de drenado HV 100-C y HV 300 se encuentran totalmente cerradas y que la válvula manual de control de flujo FV 100 está totalmente abierta (contra reloj). Posteriormente el alumno realizará la conexión de acuerdo a la Figura 4.9. Es de suma importancia que el multímetro se encuentre tomando lecturas en DC de lo contrario la caracterización estará mal realizada.

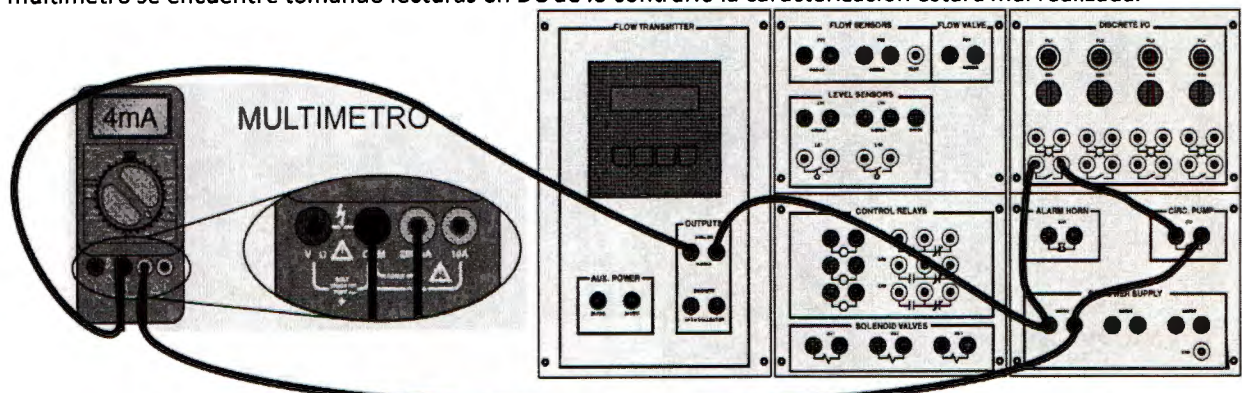


Figura 4.9 Diagrama de conexión para la caracterización del sensor capacitivo de nivel.

4.3.2. Caracterización

En el caso del sensor de nivel capacitivo la calibración esta realizada por el fabricante, por lo que el alumno realizará directamente la caracterización de la salida contra la entrada. Se comenzará tomando la medición del multímetro digital cuando el tanque de procesos se encuentra vacío. Posteriormente se accionará el interruptor SS1 para permitir que el proceso de llenado del tanque de procesos comience. Y se tomará una medida por cada pulgada trazada en el tanque de procesos. Para mayor precisión, cuando el nivel del agua alcance cada una de las marcas deseadas, se deberá accionar el interruptor SS1 para así mantener el nivel del agua hasta que la medición en el multímetro se estabilice. Repetir el proceso de llenado hasta que el nivel alcance las 10 pulgadas. Se registrarán las 10 lecturas del multímetro y se llenará con estos valores una tabla con la cual se procederá a graficar la corriente contra el nivel de agua. La relación entre las variables deberá de presentar una relación lineal incremental cuyo coeficiente de correlación (R^2) deberá acercarse a la unidad.

4.4. Sensor ultrasónico de nivel

Los sensores de ultrasonido son dispositivos para la medida de distancias o de niveles de líquido, formado por dos unidades piezoeléctricas en donde una de ellas es el emisor y la otra el receptor de ondas de presión ultrasónicas. Para esto, la unidad emisora debe excitarse con una señal adecuada en amplitud y frecuencia. La unidad receptora transducirá todas aquellas ondas de presión ultrasónicas de 40KHz que lleguen a excitarla. Si la emisión es continua, y en un recinto cerrado como en el tanque del módulo de nivel, alcanzarán la unidad receptora tanto las ondas ultrasónicas rebotadas directamente sobre la superficie del líquido como los diferentes ecos que se produzcan. La señal suministrada por el receptor será de una frecuencia de 40KHz pero en amplitud y fase variará dependiendo de la distancia y de los diferentes ecos recibidos.

El método más utilizado para la determinación de la distancia es, en lugar de excitar el emisor con una señal fija de 40KHz, a éste se envía trenes de pulsos con periodos muy cortos.

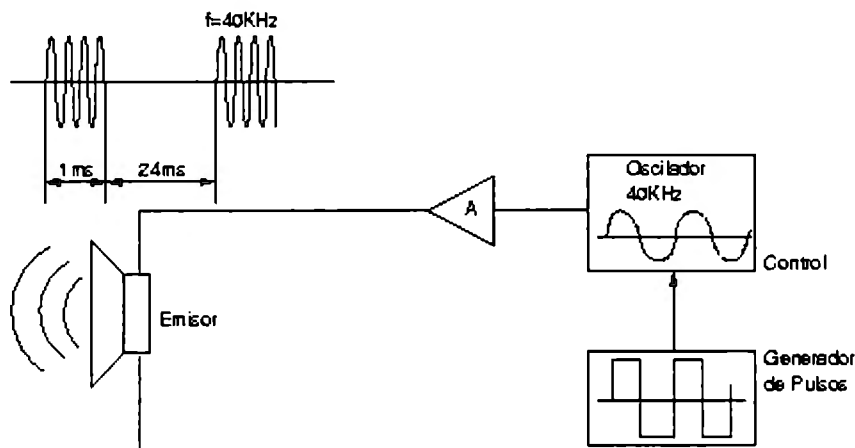


Figura 4.10 Operación de un sensor ultrasónico de distancia

El tiempo transcurrido entre el comienzo de la emisión y el comienzo de la recepción será proporcional a la distancia recorrida por las ondas de presión ultrasónicas (Pereira 2002).

4.4.1. Operación

Antes de comenzar con la operación del sistema, el alumno deberá de cerciorarse que haya suficiente agua en el tanque de depósito para el nivel en este sobrepase por mucho la marca de las 4 pulgadas. También deberá de asegurarse que las válvulas manuales de drenado HV 100-C y HV 300 se encuentran totalmente cerradas y que la válvula manual de control de flujo FV 100 está totalmente abierta (contra reloj). El sensor

de nivel debe colocarse sobre las tablas de cerámica y la tabla perforada, todo esto sobre el tanque de proceso. Posteriormente el alumno realizará la conexión de acuerdo a la Figura 4.11.

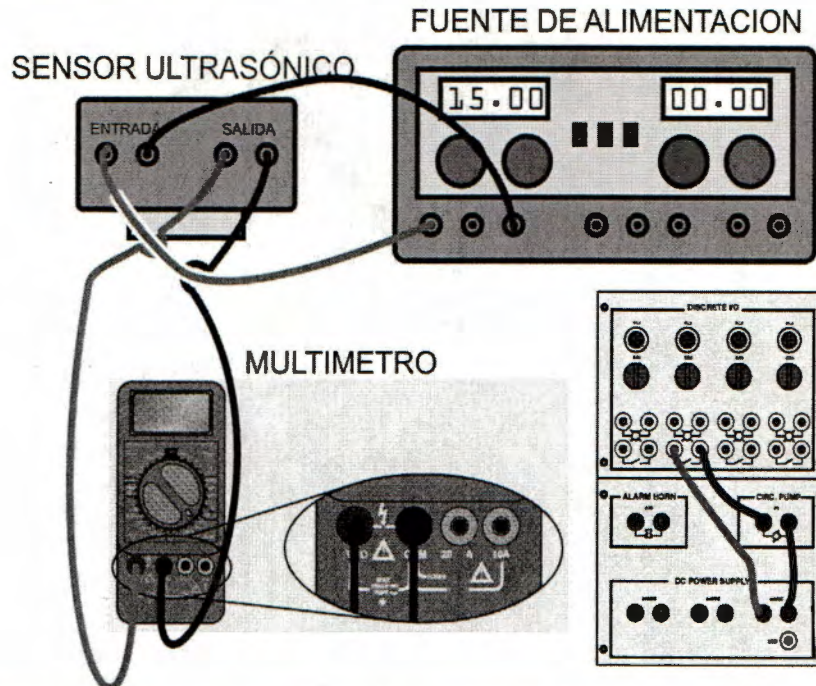


Figura 4.11 Diagrama de conexión para la caracterización del sensor ultrasónico de nivel.

4.4.2. Caracterización

En el caso del sensor de nivel ultrasónico la calibración esta realizada por el fabricante, por lo que el alumno realizará directamente la caracterización de la salida contra la entrada. Se comenzará tomando la medición del multímetro digital cuando el tanque de procesos se encuentra vacío. Posteriormente se accionará el interruptor SS2 para permitir que el proceso de llenado del tanque de procesos comience. Y se tomará una medida por cada pulgada trazada en el tanque de procesos. Para mayor precisión, cuando el nivel del agua alcance cada una de las marcas deseadas, se deberá accionar el interruptor SS2 para así mantener el nivel del agua hasta que la medición en el multímetro se estabilice. Repetir el proceso de llenado hasta que el nivel alcance las 10 pulgadas. Se registrarán las 10 lecturas del multímetro y se llenará con estos valores una tabla con la cual se procederá a graficar la corriente contra el nivel de agua. La relación entre las variables deberá de presentar una relación lineal decreciente cuyo coeficiente de correlación (R^2) deberá acercarse a la unidad.


5. Bibliografía

Smith, C.A. y Corripio, A.B. (1991), *Control Automático de Procesos. Teoría y Práctica*. México, D.F.: Editorial Limusa, S.A. de C.V.

MEDICIÓN DE NIVEL MEDIANTE EL SENSOR ULTRASÓNICO Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, 2002.

<http://ohm.utp.edu.co/paginas/docencia/labinstrem/practicas/practica4nivel.html>

9.1.3 Práctica 3 Control on/off

 <p>TECNOLÓGICO DE MONTERREY Campus Ciudad de México División de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Electrónica y Mecánica</p>	Materia:	
	Profesor:	
	Práctica No. 3	
	Fecha:	
	Equipo No.	
	Matrículas:	
Calificación:		

Control ON-OFF

1. Objetivo

El alumno desarrolle un cableado capaz de la optimización del AMATROL T5552.

El alumno realice la conexión para el control de nivel en el tanque usando un control on/off.

2. Conceptos Básicos

Un control on/off es un método de control comúnmente utilizado en aplicaciones de control de procesos como el de nivel de líquido. Éste es el diseño más sencillo y normalmente el más económico. El sistema de control on/off posee dos estados o posiciones: lleno o vacío; no existen niveles intermedios.

Como un ejemplo de un sistema on/off, existe un sistema de control de líquido, el cual se muestra en la *Figura 2.1*. Una válvula solenoide controla el flujo de salida del tanque. Dos interruptores de nivel se encuentran en los límites de los valores máximos y mínimos. El control de circuito mantiene el nivel entre los límites establecidos.

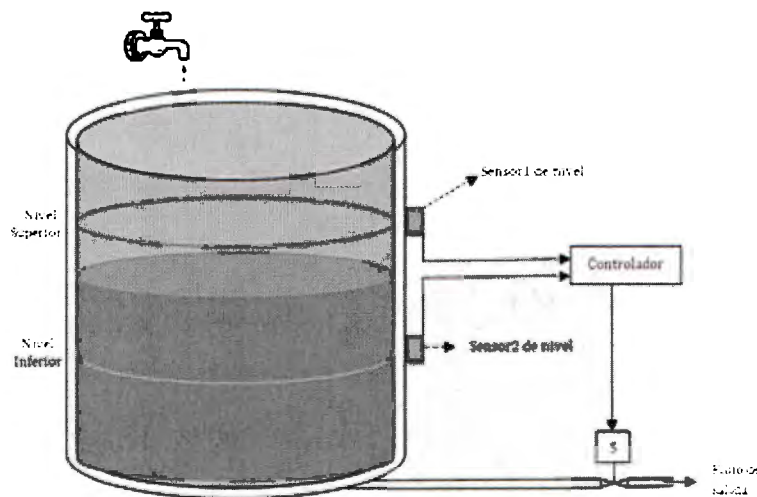


Figura 2.1 Sistema on/off básico

Cuando el nivel se encuentra por debajo del nivel inferior, el Interruptor2 (LS2) envía una señal al circuito de control, causando que el circuito de control cierre la válvula solenoide. Por lo tanto el nivel aumentará hasta que alcance el límite superior, cuando alcance ese punto ocasionará que el circuito de control abra la válvula solenoide y permita al nivel descender. Después el nivel del tanque caerá hasta que alcance el límite inferior de nuevo y el ciclo se repita. Cuando el nivel se encuentra entre los dos límites, no existe un cambio en la salida del circuito de control. Como no existe un cambio en la salida no hay un cambio de posición en el elemento de control final, en este caso la válvula solenoide. Por esta razón el área que existe entre los límites es llamada la banda muerta o zona neutral como se muestra en la *Figura 2.2*.

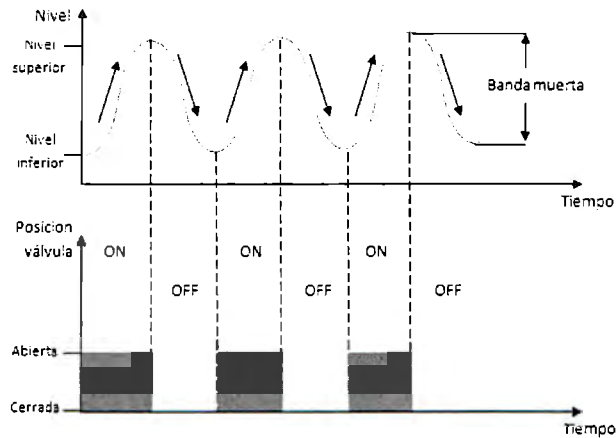


Figura 2.2 Respuesta del proceso y Posición final de la válvula

Si la banda muerta es muy estrecha, el elemento de control se prende y apaga muy frecuentemente, causando una menor vida útil en la válvula solenoide. Por lo tanto un control de sistema on/off debe ser diseñado de tal manera que la banda muerta sea amplia para prevenir frecuentes oscilaciones y que aún así el sistema de control realice sus objetivos.

Los sistemas de control on/off no tienen alcance a un punto en específico, pero en cambio provee un rango de salida entre los límites mayores y menores.

Inicialmente, se supone que se tiene un sistema no lineal al que le alimenta con una señal senoidal. Para encontrar la función descriptiva [Franklin et al., 1998] de la no linealidad, se descompone la salida en series de Fourier por lo que se tiene el resultado mostrado en la Figura 2.3 y sus ecuaciones subsecuentes.

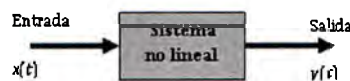


Figura 2.3 Sistema no Lineal

$$x(t) = A \sin(\omega t) \tag{1}$$

La función descriptiva N se define como

$$N = \frac{Y}{A} \angle \tan^{-1} \left(\frac{a_1}{b_1} \right) \tag{2}$$

Donde

$$Y = \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)} \quad (3)$$

La respuesta en la frecuencia en lazo cerrado de la no linealidad representada en la Figura 2.4 resulta:

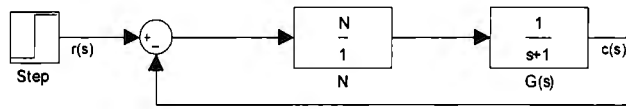


Figura 2.4 Sistema no lineal en lazo cerrado

En estas ecuaciones, usar j en lugar de w

$$\frac{C(j\omega)}{R(j\omega)} = \frac{N \cdot G(j\omega)}{1 + N \cdot G(j\omega)} \quad (4)$$

La ecuación característica es

$$1 + N \cdot G(j\omega) = 0 \quad (5)$$

Por lo que la estabilidad está definida por

$$\hat{G}(j\omega) = -\frac{1}{N} \quad (6)$$

Si la ecuación 6 se satisface, entonces la salida del sistema mostrará un ciclo límite. Esta situación corresponde al caso en que el diagrama polar de $G(j\omega)$ interseca la gráfica de $1/N$, lo que es equivalente a que en los sistemas lineales, ese diagrama polar pase por el punto crítico, $-1+j0$.

Para determinar la estabilidad del sistema se grafican el lugar geométrico de las raíces de $-1/N$ y $G(j\omega)$. El criterio de estabilidad dice que si la trayectoria de $-1/N$ no está encerrado dentro del diagrama polar de $G(j\omega)$, el sistema es estable o no hay un ciclo límite en estado estable. Si este diagrama lo envuelve, entonces el sistema será inestable.

Una vez que se tienen las especificaciones del sistema on/off, se realiza el diseño del sistema. Para esto es necesario realizar un diagrama del sistema de control, como el que se muestra en la Figura 2.3. Los círculos que contienen a CR1, CR2 Y P1 son llamados bobinas, mientras que las barras CR1 y CR2 son auxiliares. CR es la abreviación de control relay.

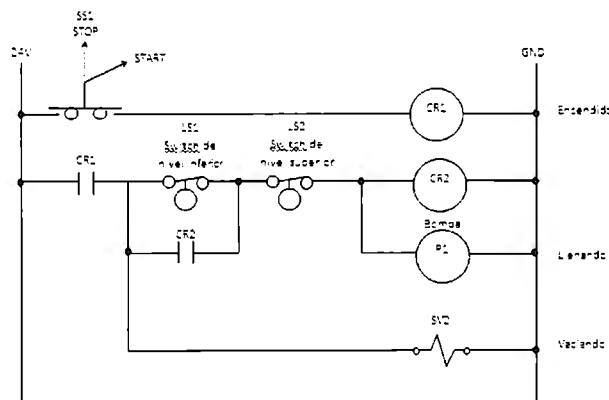


Figura 2.3 Diagrama de el control on/off

En el diagrama se puede observar que se usan dos interruptors de nivel para mantener el líquido en el nivel deseado. Estos son normalmente cerrados como se puede observar en el diagrama.

Es necesario estudiar cada uno de los casos para saber cuál es la acción necesaria del sistema. Cuando el sistema se enciende (SS1 on) la bomba se encuentra encendida, lo que causa que el sistema se esté llenando. El diseño en este sistema tiene la válvula solenoide siempre abierta, ya que el flujo de salida es menor al de entrada no existe ningún problema.

Cuando el líquido alcanza el nivel inferior, el interruptor LS1 se abre, aún así la bomba continua llenando el tanque ya que la bobina CR2 está conectada a la auxiliar CR2.

Cuando el agua alcanza el nivel superior, el interruptor LS2 se abre, de esta manera la bomba pierde la energía para funcionar y se apaga. Por lo que la válvula solenoide estará encargada de drenar el flujo.

El ciclo volverá a empezar una vez que el nivel inferior esté sensando y el nivel superior no. El proceso termina cuando SS1 esté en la posición de apagado. Todas estas especificaciones se pueden simplificar en la siguiente tabla de verdad. Los casos sombreados son los estados que existen en el diseño explicado.

Válvula Solenoide	LS1	LS2	Bomba	Observaciones
0	0	0	0	Este caso no existe en este diseño ya que la válvula solenoide siempre está encendida
0	0	0	1	
0	0	1	0	
0	0	1	1	
0	1	0	0	
0	1	0	1	
0	1	1	0	
0	1	1	1	
1	0	0	0	El sistema se encuentra apagado
1	0	0	1	El sistema esta iniciando el ciclo.
1	0	1	0	No existe este caso
1	0	1	1	No existe este caso
1	1	0	0	No existe este caso
1	1	0	1	La bomba se enciende para volver a llenar el tanque.
1	1	1	0	El nivel del líquido supera los límites y tiene que se apagada la bomba.
1	1	1	1	No existe este caso

Por lo que simplificando el diagrama queda de la siguiente manera.

LS1	LS2	Bomba
0	0	0
0	0	1
1	0	0
1	1	1

3. Desarrollo

3.1 Realizar los siguientes pasos con ayuda del profesor.

- a) Es necesario, antes de encender la máquina, realizar la configuración que se explica a continuación.
 - Colocar el cable de poder al AMATROL.
 - Llenar el tanque con el agua.
 - Cerrar las válvulas manuales del drenado del tanque.
 - Abrir las válvulas manuales HV1 y HV2.
 - Cerrar la válvula manual de control de flujo (HFV2).
- b) Alambrear el panel del AMATROL según la *Figura 2.5*
- c) Determinar el estado de los interruptores. Para el diseño del sistema se tomó en cuenta que fueran normalmente cerrados, por lo que se debe verificar que cumplan con esta condición.
 - Se puede determinar rápidamente el esto observando el elemento desde arriba. Si se puede observar la marca del fabricante, esta normalmente abierto.
- d) Determinar los niveles superior e inferior. Los interruptores se pueden ajustar según el usuario requiera.
- e) Asegurarse que SS1 está en la posición de OFF
- f) Encender la máquina
- g) Abrir la válvula manual de control de flujo (HFV2).
- h) Colocar SS1 en la posición de ON
- i) Realizar la medición de tiempo de cuanto tardó un ciclo.

3.2 Diseñar un sistema de control ON/OFF.

- a) Revisar los siguientes parámetros de diseño. Estos contienen la información necesaria para la nueva implementación a realizar
 - SS1 será el selector para simular un “pushbotton” que alimentará de energía a circuito.
 - SS2 será el selector para simular el “paro” del sistema.
 - Usar el interruptor del nivel superior a 7 pulgadas
 - Usar el interruptor de nivel inferior en 2 pulgadas
 - La bomba será regulada por un control relay.
 - La válvula solenoide será controlada por un segundo control relay
 - La bomba deberá empezar a trabajar cuando SS1 sea encendido y deberá seguir trabajando aún si SS1 se apaga.
 - La bomba deberá trabajar y llenar el tanque hasta que llegue al límite superior. Para este punto la bomba deberá detenerse y la válvula solenoide abrirse para drenar el tanque.
 - El tanque deberá volverse a llenar una vez que el límite inferior sea alcanzado, la válvula solenoide deberá cerrarse y la bomba deberá volver a trabajar.
- b) Realizar el diseño del circuito en papel, una vez hecho mostrarlo al instructor para que lo verifique.
- c) Una vez revisado por el profesor, realizar la conexión en el AMATROL sin encenderla.
- d) Preguntarle al profesor se la conexión esta correcta.
- e) En respuesta afirmativa del paso anterior, encender la máquina y verificar que el sistema cumpla con todos los requisitos.


NOTA: No existe una única solución para este diseño.

4. Bibliografía

Sin autor. (2009). Amatrol Products. Recuperado el 3 de abril de 2009, de Amatrol: Learning Systems for Technical Education. Web site: http://www.amatrol.com/Products/product.asp?part_no=T5552

Franklin, G. F., Powell, J. D. & Workman, M. L. (1998) *Digital Control of Dynamic Systems*". 3rd. Edition. Natick, MA, USA: Addison-Wesley Pub. Co.

9.1.4 Práctica 4 Control por medio de LabVIEW

 <p>TECNOLÓGICO DE MONTERREY Campus Ciudad de México División de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Electrónica y Mecánica</p>	Materia:	
	Profesor:	
	Práctica No. 4	
	Fecha:	
	Equipo No.	
	Matrículas:	
	Calificación:	

Control por medio de LabVIEW

1. Objetivo

El alumno diseñará e implementará lazos de control, de nivel y de flujo, automático PID y manual, por medio de LabVIEW y una tarjeta de adquisición de datos.

2. Introducción

2.1 LabVIEW

LabVIEW es una plataforma de National Instruments, este software es líder en la industria para sistemas de control, pruebas y diseño. Es un ambiente de desarrollo gráfico con funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de mediciones y presentaciones de datos.

Se puede utilizar LabVIEW para numerosas aplicaciones de control de procesos y automatización. Con LabVIEW se pueden realizar medidas y control de alta velocidad y con muchos canales. Para aplicaciones de automatización industrial complejas y a gran escala, los programadores de LabVIEW han diseñado el módulo de Data logging and Supervisory Control, con el que se puede monitorear gran número de puntos de E/S, comunicarse con controladores industriales y redes y proporcionar control basado en PC [Villa, 2009] [NI, 2009].

2.2 Tarjeta de adquisición de datos: DAQ NI USB-6211

El módulo USB-6211 de National Instruments es un módulo de adquisición de datos (DAQ) multifunción de la Serie M energizado por bus USB y optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas. Ofrece 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de un solo canal a 250 kS/s, dos salidas analógicas, ocho líneas de entrada digital, ocho líneas de salida digital, cuatro rangos de entrada programable (± 0.2 a ± 10 V) por canal, disparo digital y dos contadores/temporizadores.

El módulo NI USB-6211 está diseñado específicamente para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio. La instalación plug-and-play minimiza el tiempo de configuración y montaje. Este producto no requiere potencia externa.

Este módulo también cuenta con la nueva tecnología NI Signal Streaming la cual permite transferencia de datos bidireccional a alta velocidad a través del bus USB [NI, 2009].

2.3 Control PID

Un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) [Smith y Corripio, 1991] es un mecanismo de control por retroalimentación que se utiliza en sistemas de control industriales. Un controlador PID corrige el error

entre un valor medido y el valor que se quiere obtener calculándolo y luego sacando una acción correctora que puede ajustar al proceso acorde. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. Tal como en la Figura 2.1.

La acción proporcional determina la reacción del error actual. La acción integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. La acción derivativa determina la reacción del tiempo en el que el error se produce.

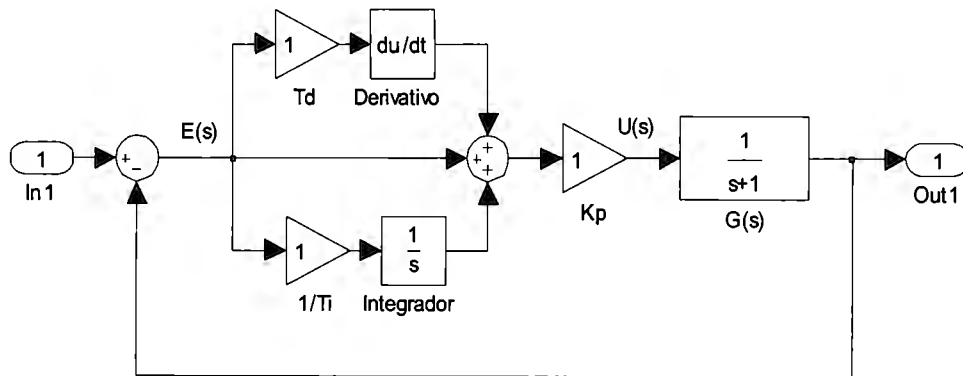


Figura 2.1 Control PID en configuración ISA

3. Equipo y material

- Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6211 o similar.
- Sensor de nivel ultrasónico.
- Cables caimán – caimán.
- Interfaz de conexión DAQ – Amatrol.
- Fuente de alimentación triple Tektronix PS280.

4. Desarrollo

4.1 Conexión

Antes de comenzar se deberá de revisar que el interruptor del Amatrol se encuentre apagado. Se realizará la interconexión entre la interfaz DAQ – Amatrol, el Amatrol T5552, el sensor ultrasónico y la fuente de alimentación según la Figura 4.1.

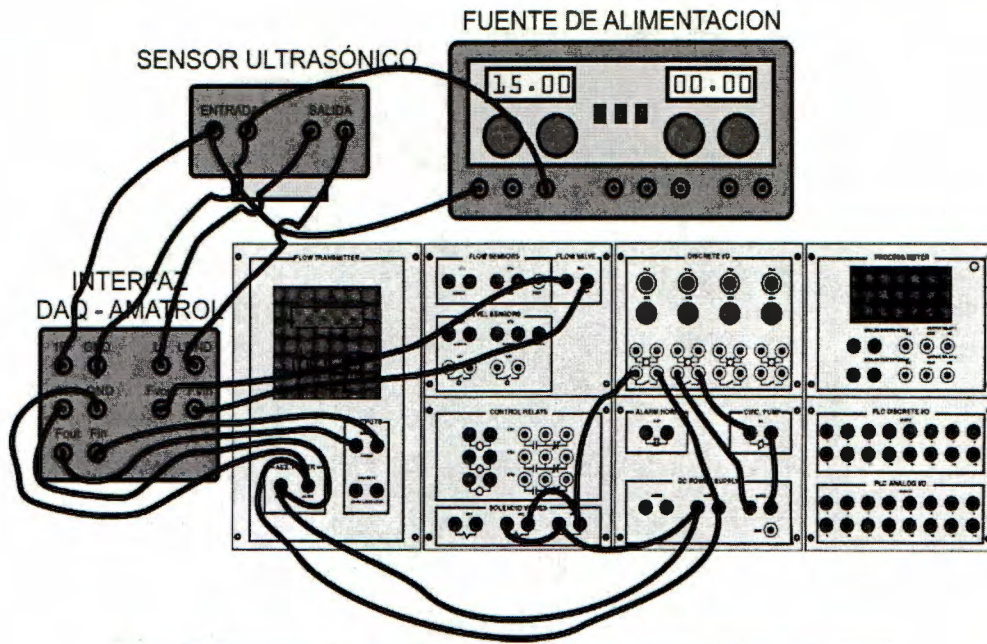


Figura 4.1 Interconexión para el control automático y manual del Amatrol T5552

4.2 Configuración

Para este paso se debe de abrir el VI de National Instruments que se facilita con este documento (Control PID – Manual.vi). El programa abrirá automáticamente en el Panel Frontal del instrumento virtual mostrando así la carátula de tu sistema como se muestra en la Figura 4.2. Es en este Panel Frontal donde se tendrá una interacción real con el programa. Para abrir el Diagrama de Bloques presiona **Ctrl+E**. Esta nueva ventana mostrará los instrumentos que se pueden apreciar en el Panel Frontal; pero en este caso, se muestran como bloques que pueden ser interconectados para así programar una secuencia lógica en la que se ejecutará el programa.

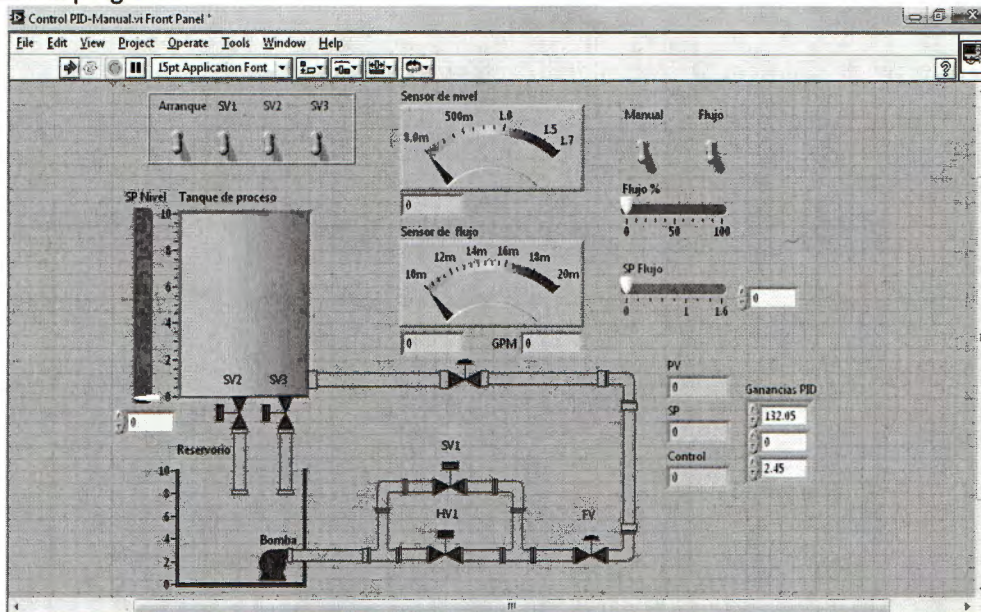


Figura 4.2 Panel Frontal del Control PID –Manual.vi

Una vez en el Diagrama de Bloques se procederá configurar las entradas y salidas que comunicarán al VI con la tarjeta DAQ. Para configurar la entrada de voltaje del lazo de nivel, el selector del Case principal que se encuentra arriba y al centro del Diagrama de Bloques deberá de encontrarse en la opción **True**. Como se muestra en la Figura 4.3.

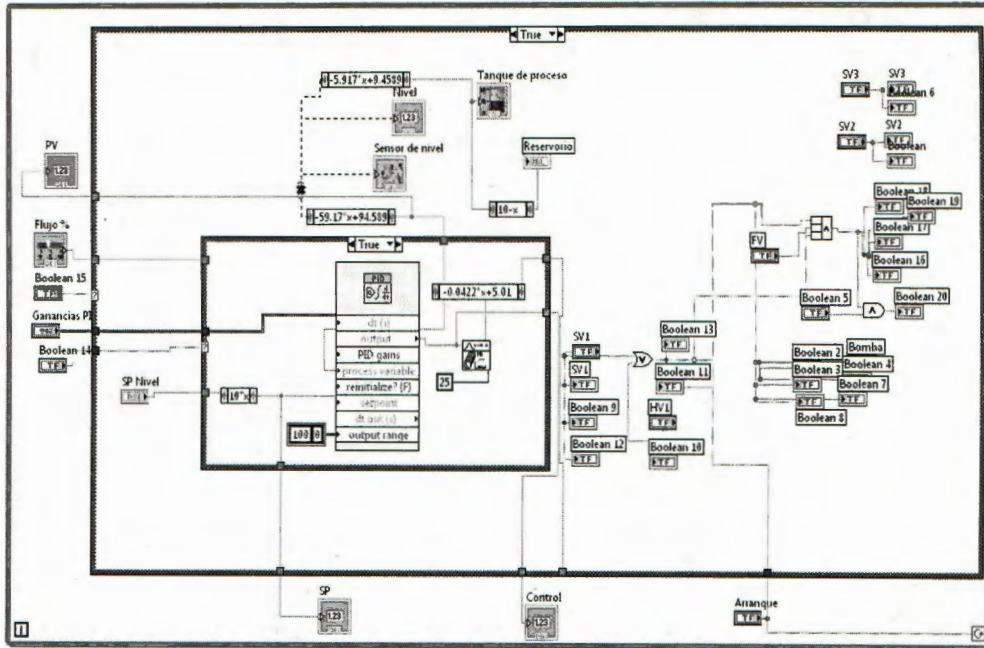


Figura 4.3 Diagrama de Bloques, selección del Case principal en True

Una vez en la ventana True se dará un click derecho con el ratón lo que mostrará la paleta de funciones o “Functions Palette”. En ella se localizará el bloque **DAQ Assistant** que se encuentra en la ruta Functions > Express > Input como se muestra en la Figura 4.4.

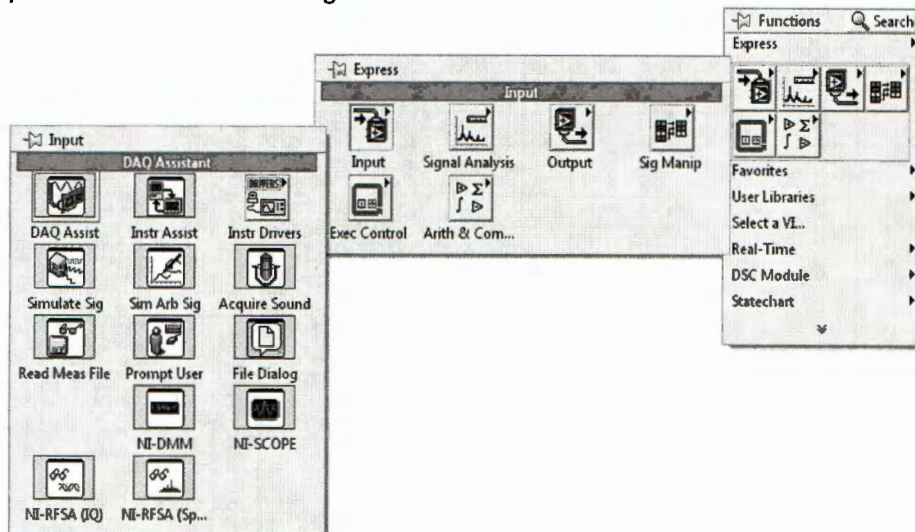


Figura 4.4 Bloque DAQ Assistant

Al colocar este bloque en el Diagrama de Bloques LabVIEW desplegará automáticamente un asistente de configuración en el que se seleccionará **Acquire Signals > Analog Input > Voltage**.

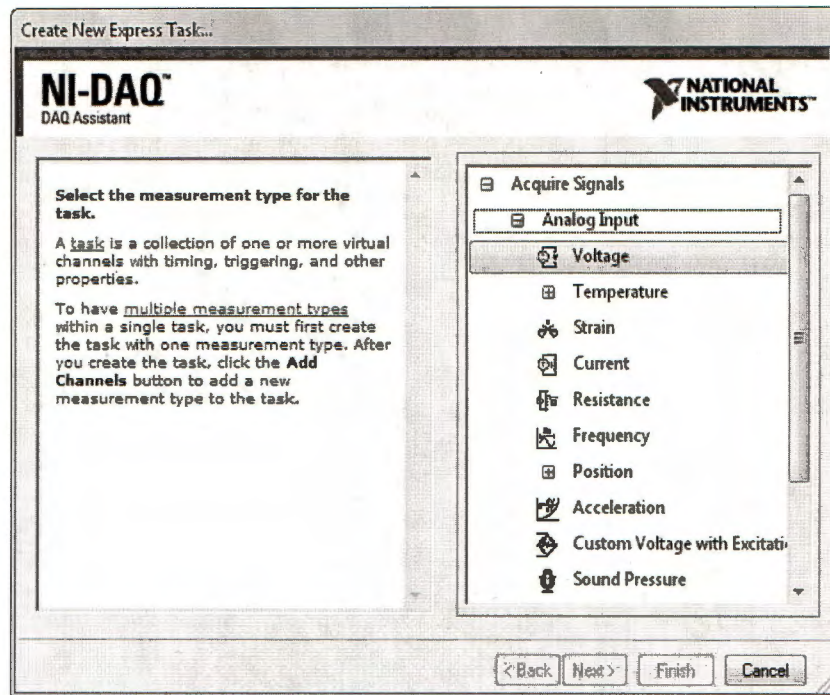


Figura 4.5 Asistente de configuración

Al seleccionar la opción Voltage el asistente pedirá que se seleccione el canal por el que se adquirirá la señal de voltaje. El canal seleccionado será ai0. Una vez hecho esto se abrirá una nueva ventana de configuración, en ella se puede ajustar los límites inferiores y superiores de nuestra señal de entrada siendo 10 y -10 los límites establecidos por el fabricante. Uno de los aspectos más importantes a cuidar es la selección de la frecuencia de muestreo, ya que determina el tiempo de respuesta de nuestro sistema. Para la implementación del control se requiere que se tome una muestra por cada ciclo de trabajo del VI por lo que se elige **1 Sample (On Demand)**. La ejecución del ciclo de trabajo del VI es tan rápida que el tiempo de muestreo se minimiza, esto da como resultado que aunque el sistema está discretizando el proceso, se puede considerar como un sistema continuo. Y finalmente se dará un click al botón OK para finalizar con la configuración de la captura de la señal del sensor de nivel.

Una vez colocado el bloque DAQ Assistant a la izquierda de los cables sin conexión, se procederá a acondicionar la señal para eliminar las variaciones que se presentan en la lectura de la señal por medio de una mediana a partir de 150 muestras por medio del bloque **Median PtByPt.vi** que se encuentra en la ruta Functions > Signal Processing > Point By Point como se muestra en la Figura 4.6

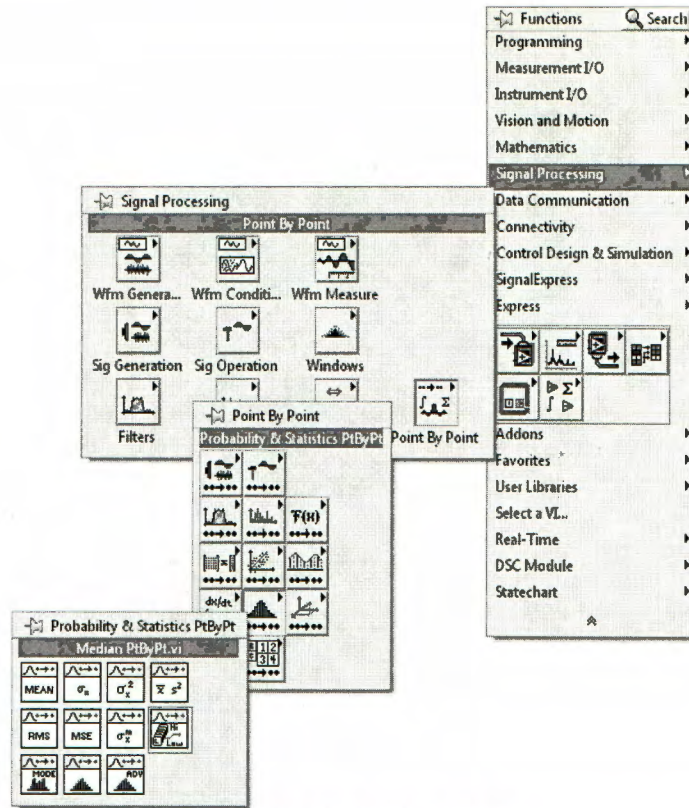


Figura 4.6 Bloque Median PtByPt.vi

Una vez colocado el bloque se tiene que localizar el nodo llamado **sample length** que se encuentra normalmente en la esquina inferior izquierda y se da click con el botón izquierdo del ratón para mostrar el menú contextual con el que se insertará una constante en la ruta **Create > Constant**. Al crearse la constante se introducirá 150 con el teclado. Finalmente se cableará, como se muestra en la Figura 4.7, la salida **data** del DAQ Assistant a la entrada **X** del bloque Median y finalmente la salida **median** de este último bloque al resto del circuito que por el momento se encuentra con líneas punteadas por presentar un error.

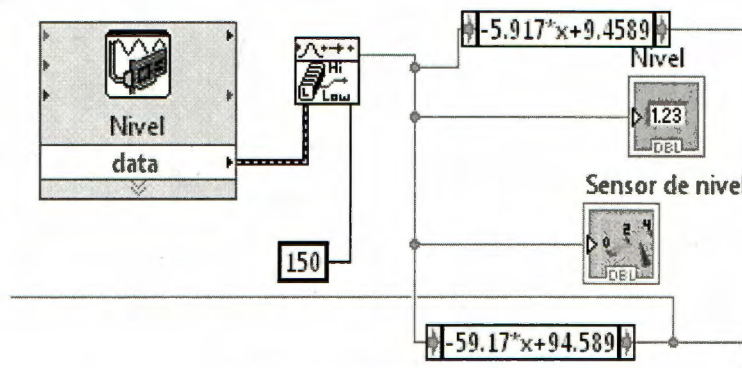


Figura 4.7 Conexión faltante

Para la configuración de la captura de la señal de corriente que entrega el sensor de flujo se procederá a seleccionar la opción **False** del selector del Case principal como se muestra en la Figura 4.8.

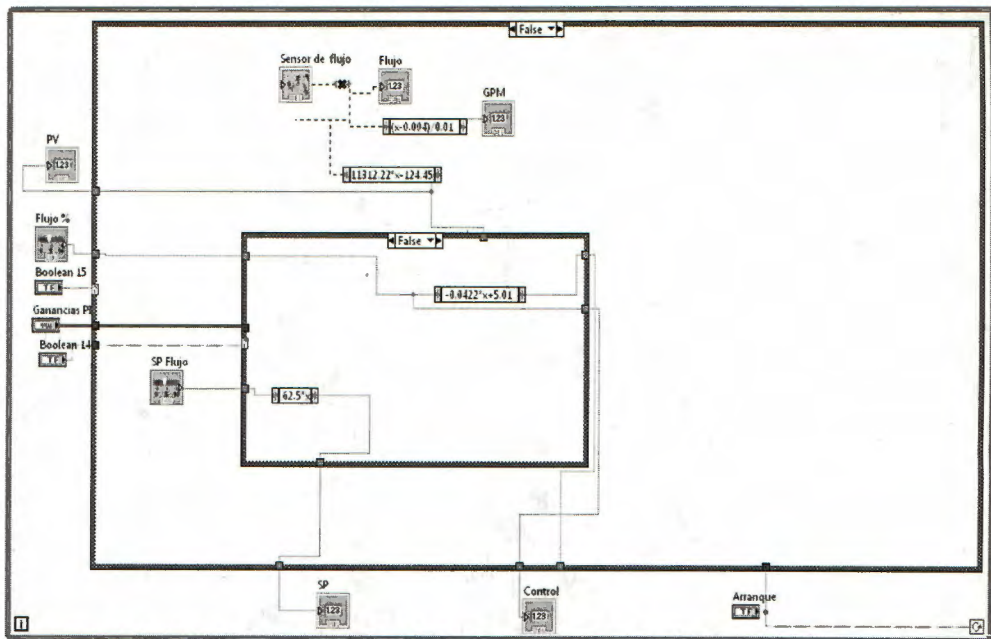


Figura 4.8 Diagrama de Bloques, selección del Case principal en False

Siguiendo la misma metodología utilizada para la captura de voltaje, se insertará un bloque de **DAQ Assistant** pero en este caso se seleccionará **Acquire Signals > Analog Input > Current** como se muestra en la Figura 4.9.

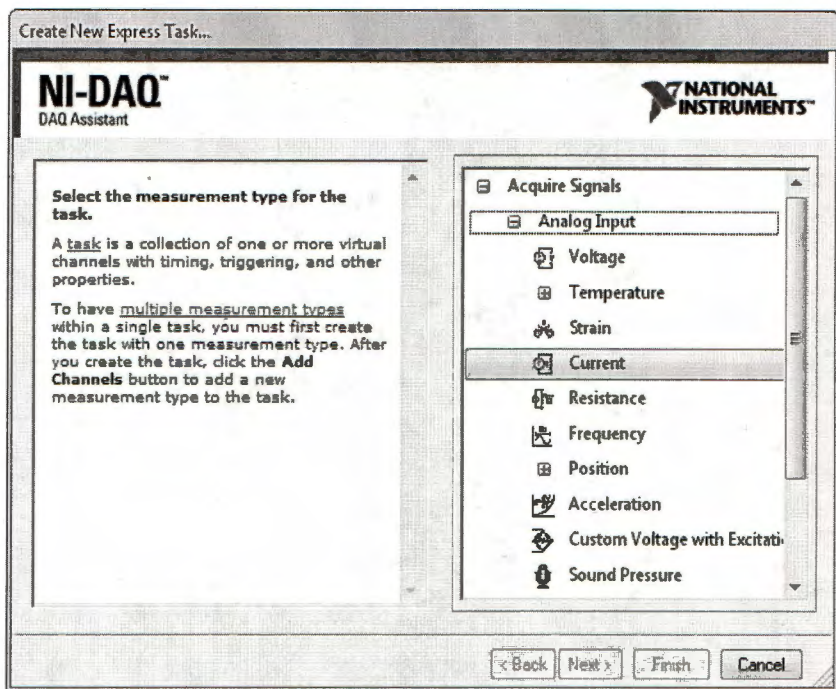


Figura 4.9 Asistente de configuración

Nuevamente al seleccionar la opción **Current** el asistente nos pedirá que se seleccione el canal por el que se adquirirá la señal de corriente. El canal seleccionado será **ai1**. Una vez hecho esto se abrirá una nueva ventana de configuración, en ella es importante darle a la resistencia shunt un valor de 100.2Ω ya que esta hará propiamente la conversión de la corriente a un valor que pueda ser medido por la tarjeta. También se tienen que elegir los valores mínimo y máximo de corriente a medir, estos serán de 0 a 25m. Esta ventana es más amplia que la corriente entregada por el sensor y con ello se evitarán posibles errores por un pico en la señal de entrada. Finalmente se seleccionará nuevamente **1 Sample (On Demand)** para nuestra frecuencia

de muestreo y se dará un click al botón OK para finalizar con la configuración de la captura de la señal del sensor de flujo.

De la misma manera se acondicionará la señal con la mediana por cada 150 muestras y se conectará como se muestra en la Figura 4.10, la salida **data** del DAQ Assistant a la entrada **X** del bloque Median y finalmente la salida **median** de este último bloque al resto del circuito que por el momento se encuentra con líneas punteadas por presentar un error.

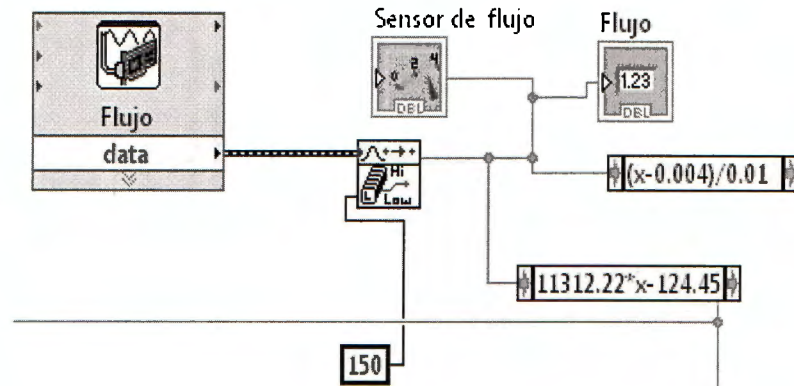


Figura 4.10 Conexión faltante

Para finalizar con la configuración se procederá a colocar el bloque que nos permitirá generar la señal para controlar la válvula proporcional. Para ello se selecciona el bloque **DAQ Assistant** de la misma manera que se ha hecho en las dos ocasiones anteriores con la diferencia de que en este caso se seleccionará Generate Signals > Analog Output > Voltage como se muestra en la Figura 4.11. Aunque la señal que requiere la válvula proporcional es de corriente, las tarjetas DAQ con las que se cuenta en los laboratorios de electrónica solo son capaces de generar voltaje. Es por ello que se elige generar voltaje y la interfaz DAQ – Amatrol será la encargada de acondicionar la señal.

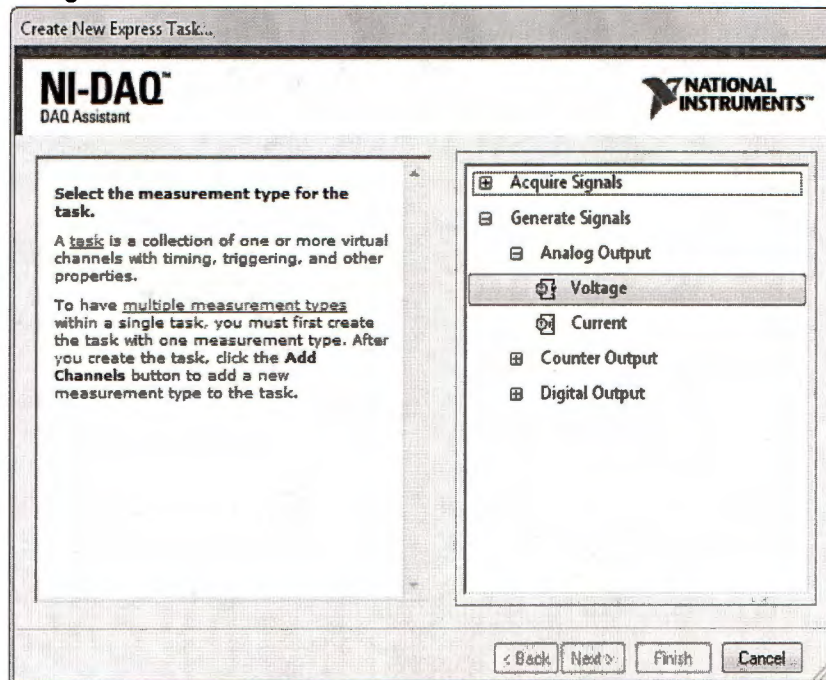


Figura 4.11 Asistente de configuración

Para generar la señal de voltaje se seleccionará el canal de salida **ao0** en la ventana que se muestra a continuación. El único parámetro que se configura en este caso será nuevamente la frecuencia de generación de la señal que será **1 Sample (On Demand)**. Los demás parámetros los conservarán los valores por defecto.

Finalmente se cablea la señal de salida del controlador que se encuentra en un nodo en la parte inferior del Case principal a la entrada **data** del bloque DAQ Assistant como se muestra en la Figura 4.12.

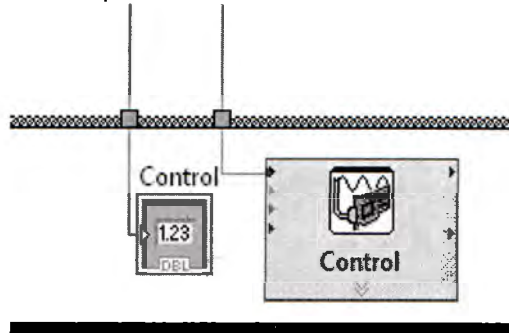


Figura 4.12 Conexión de la señal de salida

4.3 Diseño

Para esta parte es importante tener en consideración la función de transferencia de los lazos de nivel y de flujo. Estas funciones de transferencias no son asignadas por el fabricante ya que estas tienen que ver directamente con la configuración de operación del sistema. Esto es: Dependen del grado de apertura de las válvulas de desagüe del tanque, del sensor que se esté utilizando en turno, será la función de transferencia del sistema.

Con la configuración de conexión que fue indicada en la Figura 4.1 se tienen las siguientes funciones de transferencia:

Lazo de nivel.

$$G(s) = \frac{0.002020e^{-11s}}{s}$$

Lazo de flujo.

$$G(s) = \frac{0.086e^{-0.001s}}{0.009s + 1}$$

Dadas las reglas de sintonización para modelado ISE de procesos integradores que A. Visioli publicó en su artículo Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes, se deberán de encontrar los valores de ganancia para el controlador PD y llenar la siguiente tabla. Es de suma importancia notar que el valor de sintonización Td obtenidos a partir de las reglas de A. Visioli se encuentra en segundos, y que el módulo PID de LabVIEW recibe valores de Td en minutos.

	Kp	Ti	Td
Ganancias		X	

Tabla 4.1 Valores de sintonización PD

Ahora para el lazo de flujo se utilizarían normalmente las reglas de sintonización de Ziegler – Nichols pero este sistema tiene una velocidad de reacción muy elevada por lo que será mejor apegarse a las reglas de sintonización de la empresa ExperTune la cual diseña software industrial que maximiza la productividad y eficiencia y reduce los residuos en las industrias de procesos. Ellos proponen la siguiente tabla:

Lazo	Ganancia	Banda Proporcional (%)	TI (min/rep)	TD (min)
Flujo	0.1 – 2.0	50 - 1000	0.005 – 0.2	No

Tabla 4.2 Valores de sintonización propuestos por ExperTune

Determinar los valores adecuados para el tiempo T_i y la ganancia K_p . Y Llenar la siguiente tabla.

	K_p	$1/T_i$	T_d
Ganancias			X

Tabla 4.3 Valores de sintonización PI

4.4 Implementación

Una vez que se está listo para comenzar se encenderá el Amatrol por medio del interruptor que se encuentra en su costado derecho. Primero se llevará a cabo el control automático del lazo de nivel. Para ello deberán abrir el VI Control PID-Manual.vi cuidando trabajar sobre Valores de sintonización Panel Frontal. Lo primero que se debe hacer es introducir los valores de sintonización de la Tabla 4.1 que se calcularon previamente en los campos asignados para este propósito en el VI. Como se muestra en la Figura, tomar en cuenta que al no existir T_i , este campo debe forzosamente ir a cero.

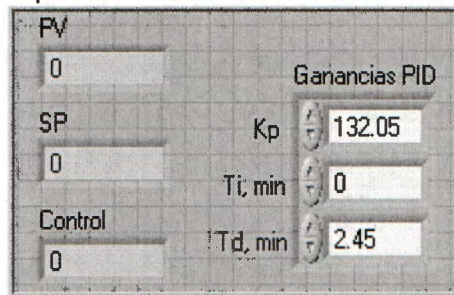


Figura 4.13 Campos de valores de sintonización

El siguiente paso es asegurarse que el selector de arranque se encuentre encendido y que los selectores del lazo de control se encuentren en **Nivel** así como en **Automático** como se muestra en la Figura 4.14.

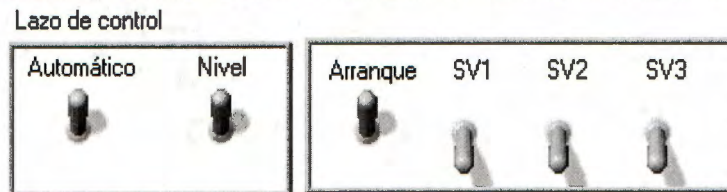



Figura 4.14 Selectores de lazo de control y de arranque

Se deberá de accionar los interruptores de la bomba y de las válvulas solenoides de drenado que se encuentran en el panel de control del Amatrol SS1 y SS2 respectivamente, para mantener el sistema con las condiciones de operación con las que fue diseñado. Una vez hecho esto se iniciará la ejecución del VI presionando el botón **Run**  que se encuentra en la barra de menú. Se modificara el selector del Setpoint al nivel del tanque de proceso real deseado como se muestra en la Figura 4.15 y se observará como el sistema controla el nivel del tanque de proceso. Comentar los resultados.

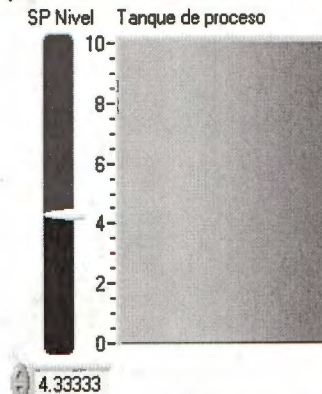


Figura 4.15 Ajuste del nivel de agua deseado

Para el control manual del lazo de nivel se accionara el selector **Automático** para cambiarlo a **Manual**. Para controlar el nivel de agua en el traque de proceso se deberá modificar el flujo de agua hacia el tanque de proceso mediante el selector **Flujo%** como se muestra en la Figura 4.16 hasta estabilizar el nivel de agua en el tanque de proceso. El alumno notará que este es un trabajo complicado.

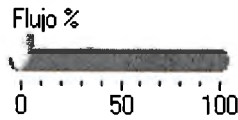


Figura 4.16 Selector del porcentaje de flujo

El siguiente paso es experimentar con el control automático del lazo de flujo. Para ello se llenarán los campos de ganancias PID como se muestra en la Figura 4.13 con los valores de la tabla 4.3 calculados previamente. Se abrirán completamente las válvulas de drenado del tanque de procesos HV 300 y HV 100-C para que no haya retención de agua en el tanque. Hecho esto se accionará el selector que se encuentra en **Nivel** para cambiarlo a **Flujo**, así como el **Manual** para llevarlo a **Automático** como se muestra en la Figura 4.17.

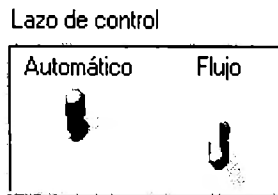


Figura 4.17 Selectores del lazo de control

Se ajustará el Setpoint de flujo hasta dejarlo en el Gasto deseado como se muestra en la Figura 4.18 y se observará como el sistema trata de estabilizar el Gasto en el nivel deseado. Comentar los resultados.



Figura 4.18 Ajuste del gasto deseado

Finalmente para el control manual del lazo de flujo se accionara el selector **Automático** para cambiarlo a **Manual**. Para controlar el flujo de agua en la tubería se deberá modificar el selector **Flujo%** como se muestra en la Figura 4.16 hasta estabilizar el flujo de agua en la red de tuberías. Comentar los resultados.

5. Bibliografía

NI USB-6211, DAQ Multifunción de la Serie M de 16 bits, 250 kS/s, Energiz

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203190>

Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=923681&isnumber=19959>

PID Tuning Tutorial <http://www.expertune.com/tutor.html>

9.2 Formato de datos en STEP 7

<i>Binario</i>	
Rango	
Palabra	2#0 a 2#1111111111111111
Doble Palabra	2#0 a 2#11111111111111111111111111111111
Ejemplo	
	→ L 2#0110 // se carga en el ACU1 el número 7 en formato binario

<i>Hexadecimal</i>	
Rango	
Byte	B#16#0 a B#16#FF
Palabra	W#16#0 a W#16#FFFF
Doble Palabra	DW#16#0 a DW#16#FFFFFFFF
Ejemplos	
	→ L B#16#1A // se carga en el ACU1 el número 26 hexadecimal de 8 bits
	→ L W#16#FACB // se carga en el ACU1 el número 64251 hexadecimal de 16 bits
	→ L DW#16#1FFE_1ABC // se carga en el ACU1 el número 536746684 hexadecimal de 32 bits

<i>BCD</i>	
Rango	
Palabra BCD de 3 cifras con signo	Signo negativo → 1111
0000 0011 0001 0000	Signo positivo → 0000
+ 3 1 0	Rango de -999 a 999
Ejemplo	
	→ L 2#0000_0011_0001_000 //se carga +310 en BCD formato en ACU1

<i>Número Entero</i>	
Denominación	I
Tamaño	16 bits, el signo es el bit más significativo
Rango	
	Números positivos → $2^{15}-1=32767$
	Números negativos → $2^{15}-1=-32767$
Ejemplos	
	→ L 1 //Carga el número entero 1 en ACU1

15
0

0000 0000 0000 0001

↑
signo

→ L -3 //Carga el número entero 3 en ACU1

Se hace el complemento a 2, cambiando ceros por unos y sumando 1.

3= 0000 0000 0011

C'1= 1111 1111 1100

+1= 1111 1111 1101

15
0

1111 1111 1111 1101

↑
signo

Número Dobles	
Denominación	D
Tamaño	32 bits, el signo es el bit más significativo
	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 31 0 </div> <div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 20px; margin: 5px 0;"></div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> ↑ byte </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-left: 20px;"> ↑ signo </div>
Rango	Números positivos → $2^{31}-1=2147483647$ Números negativos → $2^{31}-1=-2147483647$

Número Real	
Denominación	R
Tamaño	Son números binarios de 32 bits que constan de 2 partes: Mantisa : los 3 bytes más altos Exponente : el byte más alto

Ejemplos

- L 4.83 //Carga el número real 4,83 en ACU1
- El editor Step-7 lo pasa automáticamente a la forma exponencial:
- L 4.830000e+000
- Se redondea con exactitud hasta el 6 dígito. el punto es obligatorio

9.3 Tabla de Operandos

Inglés	Alemán	Característica	Tipo de datos
I	E	Bit de entrada	BOOL
IB	EB	Byte de entrada	BYTE, CHAR
IW	EW	Palabra de entrada	WORD, INT, S5TIME, DATE
ID	ED	Palabra doble de entrada	DWORD, DINT, REAL, TIME
Q	A	Bit de salida	BOOL
QB	AB	Byte de salida	BYTE, CHAR
QW	AW	Palabra de salida	WORD, INT, DATE
QD	AD	Palabra doble de salida	DWORD, DINT, REAL, TIME
M	M	Bit de memoria	BOOL
MB	MB	Byte de memoria	BYTE, CHAR
MW	MW	Palabra de memoria	WORD, INT, DATE
MD	MD	Palabra doble de memoria	DWORD, DINT, REAL, TIME
PIB	PEB	Byte de entrada de periferia	BYTE, CHAR
PQW	PAB	Byte de salida de periferia	BYTE, CHAR
PIW	PEW	Palabra de entrada de periferia	WORD, INT, DATE
PQW	PAW	Palabra de salida de periferia	WORD, INT, DATE
PID	PED	Palabra doble de entrada de periferia	DWORD, DINT, REAL, TIME
PQD	PAD	Palabra doble de salida de periferia	DWORD, DINT, REAL, TIME
T	T	Temporizador	TIMER
C	Z	Contadores	COUNTERS

9.4 Acumuladores

Existen dos acumuladores: ACU1 y ACU2. Son registros de 32 bits para el procesamiento de bytes, palabras y doble palabras. Permiten programar un intercambio de información entre módulos de E/S y áreas de memoria.

Las instrucciones de carga y transferencia son operaciones incondicionales, o sea, independientes del RLO. Por ejemplo:

A E1.0

L 2 //Carga el número 2 en ACU1 independientemente del estado de E1.0

La operación de carga se da por la instrucción L, la cual carga en ACU1 constantes y valores de los operadores. Los bytes no aprovechados se ponen a cero. Por ejemplo:

L 3 //Carga el número entero 3 (16 bits) en el ACU1

L MB20 //Carga el byte de memoria 20 en ACU1

La información se puede perder si todo se carga al acumulador y se deja ahí. La información que hubiese en ACU1 se desplaza a ACU2. Y lo que hubiese en ACU2 se pierde. Por ejemplo:

L 3 //ACU1=3

L 2 //ACU1=2; ACU2=3

L 5 //ACU1=5; ACU2=2; se pierde

La operación de transferencia se da por la instrucción T, la cual transfiere el contenido de ACU1 a una dirección de operando. La transferencia no cambia el contenido de los acumuladores. Por ejemplo:

T QB10 //Transfiere el byte más bajo del ACU1 al byte de salida 0.

T MW4 //Transfiere el contenido de la palabra baja de ACU1 a la palabra de marcas MW14

9.5 Acceso a datos en una DB

Para acceder a los datos de un DB existen dos maneras. La primera es con la ayuda de la instrucción AUF y, la segunda, más sencilla, es acceder a los datos indicando en la misma instrucción el número del DB. Algunos ejemplos se muestran a continuación.

L DB1.DBX3.0 //Carga en ACU1 el bit 3.0 del DB1

L DB1.DBB7 //Carga en ACU1 el byte 7 del DB1

L DB2.DBW4 //Carga la palabra 4 del DB2

L DB1.DBD4 //Carga la doble palabra 4 del DB1

Los formatos de los datos para manejarse dentro del DB es la siguiente.

Tipo de dato	Formato	Comentarios
Bool	0 → False. 1 → True	
Byte	B#16#3F	No permite introducirlo de la forma: 2#10010001
Palabra	W#16#AF	Permite introducirlo de la forma 2#1001..., pero lo traduce a W#16#...
Doble palabra	DW#16#FFFAF2D	

Tipo de dato	Rango	Comentarios
Entero	De -32767 a 32767	
Doble entero	De 32768 a 2147483647 y de -32769 a -2147483648	También se puede introducir de la forma: L#5, L#-10

9.6 Tabla de caracterización de Voltaje

Número Hexadecimal	Número Decimal	Voltaje ^m
0	0	-0,009
10	16	-0,003
30	48	0,009
40	64	0,012
50	80	0,018
60	96	0,024
70	112	0,029
80	128	0,036
90	144	0,041
A0	160	0,046
C0	192	0,059
D0	208	0,064
E0	224	0,07
F0	240	0,077
110	272	0,088
120	288	0,094
130	304	0,1
1E0	480	0,164
280	640	0,223
320	800	0,281
3C0	960	0,338
460	1120	0,393
500	1280	0,451
5A0	1440	0,51
640	1600	0,569
6E0	1760	0,628
780	1920	0,686
820	2080	0,745
8C0	2240	0,801
960	2400	0,86
A00	2560	0,919
AA0	2720	0,978
B40	2880	1,036
BE0	3040	1,094
C80	3200	1,15
D20	3360	1,208
DC0	3520	1,266
E60	3680	1,326
F00	3840	1,384
FA0	4000	1,442
1040	4160	1,499
10E0	4320	1,557
12C0	4800	1,732

14A0	5280	1,903
1680	5760	2,078
1860	6240	2,252
1A40	6720	2,428
1C20	7200	2,604
1E00	7680	2,775
1FE0	8160	2,952
21C0	8640	3,131
23A0	9120	3,306
2580	9600	3,476
2760	10080	3,65
2940	10560	3,823
2B20	11040	4
2D00	11520	4,173
2EE0	12000	4,348
30C0	12480	4,521
32A0	12960	4,698
3480	13440	4,869
3660	13920	5,042
3840	14400	5,214
3A20	14880	5,388
3C00	15360	5,562
3E30	15920	5,762
4060	16480	5,971
4290	17040	6,177
44C0	17600	6,377
46F0	18160	6,58
4920	18720	6,79
4B50	19280	6,99
4D80	19840	7,19
4FB0	20400	7,39
51E0	20960	7,59
5410	21520	7,8
5640	22080	7,99
5870	22640	8,19
5AA0	23200	8,4
5CD0	23760	8,59
5F00	24320	8,79
6130	24880	9
6360	25440	9,2
6590	26000	9,41
67C0	26560	9,61
69F0	27120	9,81
6C20	27680	10,01

6E50	28240	10,21
7080	28800	10,41
72B0	29360	10,62
74E0	29920	10,81
7710	30480	11,02
7940	31040	11,22
7B70	31600	11,42
7CB0	31920	11,54
7DF0	32240	11,65
7E40	32320	11,68
7E90	32400	11,71
7EE0	32480	11,74
7EFF	32511	11,75
7F00	32512	-0,009
7F30	32560	-0,009
7FD0	32720	-0,009
8070	32880	-0,008
80C0	32960	-0,009
80F0	33008	-0,008
80FF	33023	-0,008
8100	33024	-11,81
8110	33040	-11,81
8110	33040	-11,81
82F0	33520	-11,63
84D0	34000	-11,47
86B0	34480	-11,3
8890	34960	-11,13
8A70	35440	-10,95
8C50	35920	-10,77
8E30	36400	-10,6
9010	36880	-10,42
91F0	37360	-10,25
93D0	37840	-10,07
95B0	38320	-9,9
9790	38800	-9,73
9970	39280	-9,55
9B50	39760	-9,38
9D30	40240	-9,21
9F10	40720	-9,03
A0F0	41200	-8,85
A2D0	41680	-8,68
A5F0	42480	-8,39
A910	43280	-8,1

AC30	44080	-7,81
AF50	44880	-7,52
B270	45680	-7,23
B590	46480	-6,94
B8B0	47280	-6,66
BBD0	48080	-6,37
BEF0	48880	-6,08
C210	49680	-5,78
C530	50480	-5,49
C850	51280	-5,189
CB70	52080	-4,901
CE90	52880	-4,612
D1B0	53680	-4,321
D4D0	54480	-4,032
D7F0	55280	-3,739
DB10	56080	-3,446
DE30	56880	-3,158
E150	57680	-2,86
E470	58480	-2,573
E790	59280	-2,283
EAB0	60080	-1,992
EDD0	60880	-1,703
F0F0	61680	-1,411
F410	62480	-1,21
F870	63600	-0,72
FCD0	64720	-0,312
FD70	64880	-0,254
FE10	65040	-0,196
FEB0	65200	-0,137
FFF0	65520	-0,02
10000	65536	-0,008
10010	65552	-0,002
1001F	65567	-0,002
10020	65568	0,005
1003F	65599	0,011
10040	65600	0,013
10130	65840	0,099
10590	66960	0,503
18290	98960	11,67

9.7 Tabla de caracterización de Corriente

Valor Hexadecimal	Valor Decimal	Corriente [mA]
0	0	3,97
1E0	480	4,24
3C0	960	4,52
5A0	1440	4,8
780	1920	5,08
960	2400	5,36
B40	2880	5,65
D20	3360	5,94
F00	3840	6,21
10E0	4320	6,49
12C0	4800	6,76
14A0	5280	7,05
1680	5760	7,32
1860	6240	7,59
1A40	6720	7,88
1C20	7200	8,16
1E00	7680	8,44
1FE0	8160	8,73
21C0	8640	9
23A0	9120	9,28
2580	9600	9,56
2760	10080	9,83
2940	10560	10,11
2B20	11040	10,39
2D00	11520	10,66
2EE0	12000	10,95
30C0	12480	11,21
32A0	12960	11,49
3480	13440	11,77
3660	13920	12,06
3840	14400	12,35
3A20	14880	12,58
3C00	15360	12,9
3DE0	15840	13,18
3FC0	16320	13,45
41A0	16800	13,75
4380	17280	14,01
4560	17760	14,28
4740	18240	14,56
4920	18720	14,84
4B00	19200	15,12
4CE0	19680	15,4
4EC0	20160	15,66

50A0	20640	15,95
5280	21120	16,23
5460	21600	16,5
5640	22080	16,77
5820	22560	17,04
5A00	23040	17,32
5BE0	23520	17,6
5DC0	24000	17,88
5FA0	24480	18,17
6180	24960	18,44
6360	25440	18,72
6540	25920	19
6720	26400	19,28
6900	26880	19,56
6AE0	27360	19,82
6CC0	27840	20,09
6EA0	28320	20,37
7080	28800	20,65
7260	29280	20,92
7440	29760	21,21
7620	30240	21,48
7800	30720	21,74
79E0	31200	22,03
7BC0	31680	22,32
7DA0	32160	22,59
7EFF	32511	22,78
7F00	32512	-0,06
7F80	32640	-0,06
8160	33120	-0,06
8340	33600	-0,06

9.8 Tabla de Variables de FB41 CONT_C CONT

Parámetros de entrada					
Dirección	Parámetros	Tipo de datos	Rango de valores	Por defecto	Característica
0.0	COM_RST	BOOL		FALSE	<i>Restart Completo</i> El bloque tiene una rutina de inicialización cuando está activada esta entrada.
0.1	MAN_ON	BOOL		TRUE	<i>Modo Manual</i> Si está activada esta entrada el lazo es interrumpido.
0.2	PVPER_ON	BOOL		FALSE	<i>Variable de procesos por periferia encendida</i> Si esta en false la variable de proceso se lee por PV_IN; si está en true se lee por medio de un puerto de la periferia (PV_PER)
0.3	P_SEL	BOOL		TRUE	<i>Conectar acción P</i> En el algoritmo PID pueden conectarse y desconectarse individualmente las acciones PID. La acción P está conectada si esta entrada esta en true.
0.4	I_SEL	BOOL		TRUE	<i>Conectar acción I</i> La acción I está conectada si esta entrada esta en true.
0.5	INT_HOLD	BOOL		FALSE	<i>Congelar acción I</i> La salida del integrador puede congelarse. Para ello se debe activar esta entrada.
0.6	I_ITL_ON	BOOL		FALSE	<i>Inicializar acción I</i> La salida del integrador puede inicializarse a la entrada I_ITLVAL. Para ello se debe activar esta entrada.
0.7	D_SEL	BOOL		FALSE	<i>Conectar acción D</i> La acción D está conectada si esta entrada esta en true.
2.0	CYCLE	TIME	>=1MS	T#1s	<i>Tiempo de muestreo</i> El tiempo entre las llamadas del bloque debe ser constante.
6.0	SP_INT	REAL	-100.0 a 100.0 %	0.0	<i>Set point interno</i> Ajustar un valor de set point.
10.0	PV_IN	REAL	-100.0 a 100.0 %	0.0	<i>Entrada de variable de proceso</i> Esta entrada es de tipo real, puede interconectarse a una entrada de punto flotante. PVPER_ON debe estar en false para que esta este activada.
14.0	PV_PER	WORD		W #16# 0000	<i>Entrada de variable de proceso por periferia</i> La entrada se toma por uno de los puertos periféricos. PVPER_ON debe estar en true.
16.0	MAN	REAL	-100.0 a 100.0 %	0.0	<i>Valor manual</i> Sirve para establecer un valor manual mediante función de manejo/visualización.
20.0	GAIN	REAL		2.0	<i>Ganancia proporcional</i> Indica la ganancia del PID.
24.0	TI	TIME	>= CYCLE	T#20s	<i>Tiempo de acción integral</i> Determina el comportamiento temporal del integrador.

28.0	TD	TIME	>= CYCLE	T#10s	<i>Tiempo de acción derivativa</i> Determina el comportamiento temporal del diferenciador.
32.0	TM_LAG	TIME	>= CYCLE/2	T#2s	<i>Tiempo de retardo de la acción D</i> El algoritmo de la acción D contiene un retardo que puede parametrizarse en esta entrada.
36.0	DEADB_W	REAL	>=0.0(%)	0.0	<i>Ancho de zona muerta</i> Si la entrada tiene mucho ruido, se utiliza esta parte la cual dará un rango de banda muerta.
40.0	LMN_HLM	REAL	EL 100.0%	100.0	<i>Límite superior del valor manipulado</i> El valor manipulado tiene siempre un límite superior y uno inferior.
44.0	LMN_LLM	REAL	EL -100.0%	0.0	<i>Límite inferior del valor manipulado</i> El valor manipulado tiene siempre un límite superior y uno inferior.
48.0	PV_FAC	REAL		1.0	Factor de valor real Esta entrada sirve para la adaptación del margen de valor real. Se puede decir que es la pendiente.
52.0	PV_OFF	REAL		0.0	<i>Offset del valor real</i> Esta entrada se suma con el valor real. La entrada sirve para la adaptación del margen de valor real.
56.0	LMN_FAC	REAL		1.0	<i>Factor del valor manipulado</i> Esta entrada se multiplica por el valor manipulado. La entrada sirve para la adaptación del margen de valor manipulado.
60.0	LMN_OFF	REAL		0.0	<i>Offset del valor manipulado</i> Esta entrada se suma al valor manipulado. La entrada sirve para la adaptación del margen de valor manipulado.
64.0	I_ITVAL	REAL	-100.0 a 100.0 %	0.0	<i>Valor de inicialización de la acción I</i> La salida del integrador puede ponerse en la salida I_ITL_ON.
68.0	DISV	REAL	-100.0 a 100.0 %	0.0	<i>Variable perturbadora</i> Es posible en este regulador meter una perturbación.

Parámetros de Salida				
Dirección	Parámetros	Tipo de datos	Por defecto	Característica
72.0	LMN	REAL	0.0	<i>Valor manipulado</i> Se saca en formato en coma flotante el valor manipulado que actúa efectivamente.
76.0	LMN_PER	WORD	W #16# 0000	<i>Valor manipulado de periferia</i> El valor manipulado en formato de palabra se interconecta con el regulador en la salida "Valor manipulado periferia".
78.0	QLMN_HLM	BOOL	FALSE	<i>Alcanzado el límite superior del valor manipulado</i> El valor manipulado tiene siempre un límite superior y un límite inferior. Esta salida indica la superación de la limitación superior.
78.1	QLMN_LLM	BOOL	FALSE	<i>Alcanzado el límite inferior del valor manipulado</i> Esta salida indica la superación de la limitación inferior.

80.0	LMN_P	REAL	0.0	<p style="text-align: center;"><i>Acción P</i></p> <p>La salida "Acción P" contiene la componente proporcional de la magnitud manipulada.</p>
84.0	LMN_I	REAL	0.0	<p style="text-align: center;"><i>Acción I</i></p> <p>La salida "Acción I" contiene la componente integral de la magnitud manipulada.</p>
88.0	LMN_D	REAL	0.0	<p style="text-align: center;"><i>Acción D</i></p> <p>La salida "Acción D" contiene la componente diferencial de la magnitud manipulada.</p>
92.0	PV	REAL	0.0	<p style="text-align: center;"><i>Variable de proceso real</i></p> <p>Por la salida "Valor real" se emite el valor real que actúa efectivamente.</p>
96.0	ER	REAL	0.0	<p style="text-align: center;"><i>Error de regulación</i></p> <p>Por la salida "Error de regulación" se emite la diferencia o error de regulación que actúa efectivamente.</p>

Referencias

- Alfaro V.M, *Ecuaciones para Controladores PID Universales, Ingeniería*, vol.12, no.1, pp. 11-20, 2002.
- Alfaro V.M, *Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo abierto*. Publication: Ingeniería Recuperado el 10 de Octubre de 2009. Web Site: <http://www.allbusiness.com/information/publishing-industries/840675-1.html>. 2001
- Aström K.J. and Hägglund T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Research Triangle Park, NC: Instrum. Soc. Amer., 1995.
- Franklin G. F., Powell, J. D. & Workman, M. L, *Digital Control of Dynamic Systems"*. 3rd. Edition. Natick, MA, USA: Addison-Wesley Pub. Co. 1998
- Johnson, M y Mohammad, M. *PID Control, New Identification and Design Methods*. New York: Springer. 2005
- Li Y., Ang K. H., and G. Chong, *PID control system analysis and design, IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 26, no.1, pp.32-41, 2006.
- Ogata, K. *Ingeniería de Control Moderna* (pág. 2). Madrid, España: Prentice Hall. 2003
- Paz Marco, *Apuntes de Ingeniería de Control Moderna*, 2008
- NI USB-6211, DAQ Multifunción de la Serie M de 16 bits, 250 kS/s, Energiz <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203190>. 2009
- Sin autor, *PID Tuning Tutorial* Recuperado el 20 de Octubre de 2009. Web Site: <http://www.expertune.com/tutor.html>.
- Sin autor, Automatización Sync. Descripción del PLC. Recuperado el 20 de marzo de 2009. Web site: <http://www.automatizacioncnc.com/articulos-e-informacion/5-articulos-e-informacion/18-ique-es-un-plc-y-que-beneficios-tiene.html>.
- Sin autor, National Instruments. Descripción de una red industrial. Recuperado el 23 de marzo de 2009. Web site: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6296>.

- Sin autor, Siemens. CPU 314C-2DP. Recuperado el 15 de octubre de 2009. Web Site:
<http://support.automation.siemens.com/WW/llisapi.dll?func=cslib.csinfo&lang=es&objid=6ES7314-6CF00-0AB0&caller=view>.

- Villa J, Solaque L y Grisales H, National Instruments. Descripción de LabVIEW. Recuperado el 1 de abril de 2009. Web site:
<http://digital.ni.com/worldwide/latam.nsf/web/all/0312BC7214E95CFF86256B5F00655462>.

- Visioli, A. *Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes*, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 148, No. 2, Mrn-cli 2001.