DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA PARA EL CONTROL DE NIVEL Y TEMPERATURA DEL TANQUE DE AGUA CALIENTE DE LA PLANTA DE PROCESOS ANÁLOGOS (PPA).



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

ARIAS ALVARADO YIMER EFREN
PIRACOCA MIGUEL ÁNGEL

Tesis de Ingeniería en Control

Director:
Ing. JORGE EDUARDO PORRAS

Co-Director:
Ing. Msc ANDRÉS ESCOBAR DÍAZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Universidad Distrital "Francisco José De Caldas"
Facultad Tecnológica
Programa de Ingeniería en Control
Bogotá, Octubre de 2015

ARIAS ALVARADO YIMER EFREN
PIRACOCA MIGUEL ÁNGEL

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA PARA EL CONTROL DE NIVEL Y TEMPERATURA DEL TANQUE DE AGUA CALIENTE DE LA PLANTA DE PROCESOS ANÁLOGOS (PPA).

Tesis presentada al programa de Ingeniería en Control de la Universidad Distrital "Francisco José De Caldas" Facultad Tecnológica, para obtener el título de Ingeniero en Control

Programa
Ingeniería en Control

Director:
Ing. JORGE EDUARDO PORRAS

Co-Director:
Ing. Msc ANDRÉS ESCOBAR DÍAZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Bogotá, Octubre de 2015

HOJA DE ACEPTACIÓN

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA PARA EL CONTROL DE NIVEL Y TEMPERATURA DEL TANQUE DE AGUA CALIENTE DE LA PLANTA DE PROCESOS ANÁLOGOS (PPA).

Observaciones:

_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____

_____
Director del proyecto
Ing. JORGE EDUARDO PORRAS

_____
Co-Director del proyecto
Ing. Msc Andrés Escobar Díaz

_____
Evaluador del proyecto

Octubre de 2015



Dedicatorias

A mi familia por el tiempo que no pude estar con ellos; mis hijos que con su alegría y ternura me dan ánimo de continuar, Sara por su amor y comprensión, mis padres y hermanas por la gran enseñanza de cómo enfrentar la vida sin decaer a pesar de las dificultades y mis amigos que conocí en la universidad, que espero estar en contacto con ellos siempre.

Yimer E. Arias Alvarado

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



A Dios por la vida que me regala; Mi hermosa madre que ha sido un apoyo incondicional, brindándome amor, confianza y oportunidades para lograr mis sueños. A mi familia; Abuelos por enseñarme que con poco los sueños son infinitos, tíos; Por su amor, generosidad y enseñanzas. A cada uno de mis amigos que conocí en la universidad, con los que compartí momentos muy especiales.

Miguel Ángel Piracoca

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



Agradecimientos

A la Facultad Tecnológica de la Universidad por darnos la oportunidad de crecer profesionalmente, a cada uno los docentes que profesaron su conocimiento y a nuestros amigos y compañeros por cada uno de los momentos compartidos; todos ellos nos dejaron una enseñanza de vida.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Resumen

El laboratorio Especializado Sistema Altamente Automatizado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, ubicada en la localidad de Ciudad Bolívar (Bogotá-Colombia), cuenta con una planta didáctica que recibe el nombre de Planta de Procesos Análogos (PPA), la cual se desarrolló por parte de los estudiantes para la materia de Instrumentación de Procesos II del Programa de Ingeniería en Control.

La PPA tiene el objetivo de facilitar el aprendizaje teórico-práctico de materias enfocadas a procesos industriales, automatización, instrumentación, control y áreas a fines.

Cuenta con un panel de control, dos actuadores, tres tanques, conexiones hidráulicas, conexiones eléctricas y un armazón. El tanque de agua caliente de la PPA no posee elementos para la medición de las variables de temperatura y nivel, ni cuenta con un medio que permita realizar aplicaciones de algoritmos de control para ajuste y manipulación del proceso que se desee emular.

Entendiendo la necesidad de controlar, supervisar el nivel y la temperatura del tanque de agua caliente de la PPA, se seleccionaron e instalaron sensores tipo industrial que permitieron la identificación y modelamiento del tanque de forma experimental usando métodos paramétricos, mediante el software MATLAB y los datos obtenidos experimentalmente, se obtuvo la expresión matemática que permitió observar gráficamente el comportamiento del sistema. Seguidamente se realizó la sintonización de los lazos de control, la estrategia de control para la variable de temperatura que se desarrollo fue ON_OFF y para la variable de nivel PID, que fueron implementados en el Controlador Lógico Programable (PLC) "Allen-Bradley 1769_L23E_QB1B" y con una interfaz gráfica en pantalla HMI (Panelview plus 600 de Allen-Bradley) para la supervisión y modificaciones de las variables del proceso. El sistema queda sujeto a futuras modificaciones, que podrían ser la implementación de controladores basados en sistemas inteligentes y permitiendo la comparación con los sistemas de control convencionales para el desarrollo de prácticas.

Este trabajo emula un proceso básico de dos variables (Nivel y Temperatura) en el tanque de agua caliente de la PPA, mediante el desarrollo e implementación de un sistema de control, supervisión y adquisición de datos (SCADA) que permite el control de las variables mediante una pantalla HMI.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Palabras Clave: lazos de control, control digital, temperatura, nivel, Armax SCADA.

Abstract

The laboratory specialized system highly automated of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, located in the town of Ciudad Bolívar (Bogotá-Colombia), has a didactic plant that receives the name of plant of similar processes (PPP), which was developed by the students for the field of process instrumentation II of the engineering program in Control.

The PPA aims to provide theoretical and practical learning materials focused on industrial processes, automation, instrumentation, control and areas at the end.

It has a control panel, two actuators, three tanks, hydraulic connections, electrical connections and a frame. Tank of hot water of the PPA does not have elements to measure the variables of temperature and level, nor has a medium that allow application control algorithms for adjustment and manipulation of the process that you want to emulate.

Understanding the need to control, monitor the level and the temperature of the tank of hot water of the PPA, were selected and installed industrial sensors that allowed the identification and modeling of tank experimentally using parametric methods, using the MATLAB software and data obtained experimentally, was obtained the mathematical expression which allowed graphically observe the behavior of the system. Then was made the tuning of control loops, control strategy for variable temperature developed was ON_OFF and for the variable level PID, which were implemented in the controller programmable logic (PLC) "Allen-Bradley 1769 L23E QB1B" and with a graphical interface on screen HMI (Panelview plus 600 Allen-Bradley) for monitoring and modifications of the process variables. The system is subject to future modifications that could be the implementation of controllers based on intelligent systems and allowing comparison with conventional control systems for the development of practices.

This work emulates a basic process of two variables (level and temperature) in the hot water tank of the PPA, through the development and implementation of a system of control, supervision and data acquisition (SCADA) that allows control of the variables using an HMI screen.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Key Words: control loops, digital control, temperature, level, Armax SCADA.

Tabla de contenido

Resumen 16

Abstract 17

1. Introducción 23

1.1 Planteamiento del Problema 24

1.2 Objetivos 25

1.2.1 Objetivos General 25

1.2.2 Objetivos Específicos 25

2 Marco de Referencia 26

2.1. Antecedentes 26

3. Metodología 27

3.1 Marco Teórico 27

3.1.1 Sistemas De Niveles Líquidos. 27

3.1.2 Sistemas térmicos 33

3.1.3 Ecuaciones Generales Sistema 34

3.1.3 Sensores 36

3.1.4 Transformada Z 38

3.1.5 Sistemas de control. 38

3.1.6. Controladores. 39

3.1.7 Métodos de identificación de sistemas 42

3.1.8 Descripción de la planta y elementos 45

4. Resultados. 50

4.1 Dimensionamiento tanque agua Caliente 50

4.1.1 Volumen tanque (Matemáticamente) 51

4.1.2 Volumen tanque (experimentalmente) 51

4.1.3 Bomba 52

4.1.3 Selección de Sensores 53

4.1.4 Instalación y Acoplamiento de Sensores 55

4.1.5 Linealización de los Sensores 59

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

4.1.6 Configuración y Adecuación de Equipos de Trabajo. 67
4.1.7 Identificación del Sistema y Representación 74
4.1.8 Estimulación al sistema mediante la señal cuadrada y pseudo para controlador PID. 85
4.1.9 Análisis matemático para determinar las constantes PID 87
5. Controladores 91
5.1 Configuración Bloque PID Rslogix 500 91
5.1.1 PID, Pruebas, Simulación 93
5.2 Configuración Control On_Off 93
5.3 On_Off Pruebas, Simulación 94
5.4 HMI (Scada) 95
Conclusiones 99
Recomendaciones 100
Referencias 101
Anexos ..... **¡Error! Marcador no definido.**

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Lista de Figuras

Fig. 1: Flujo Laminar Fig. 2 Flujo Turbulento 27
Fig. 3 Sistema Nivel Líquido [5] 28
Fig. 4 Medición de nivel tanque abierto [8] 36
Fig. 5 Relación, Calculo de la Presión [8] 37
Fig. 6 Sensor de Nivel ON_OFF 37
Fig. 7 Sistema General en tiempo discreto [10]. 39
Fig. 8 Estructura Sistema SISO (una entrada una salida) 40
Fig. 9 Diagrama de bloques modelos paramétricos. [12] 44
Fig. 10 Planta de Procesos Análogos PPA 46
Fig. 11 Diagrama de bloques PPA. 47
Fig. 12 PLC de la PPA 47
Fig. 13 Modulo entradas análogas 1769-IF4 48
Fig. 14 Pantalla HMI Plus 600 de Allen-bradley 49
Fig. 15 Variador PowerFlex40 49
Fig. 16 Actuador 49
Fig. 17 Tanque de agua caliente de la PPA 50
Fig. 18 Dimensiones tanque de agua caliente 50
Fig. 19 Pipeta 1 litro de agua. 51
Fig. 20 Frecuencia Vs Litros/min 53
Fig. 21 Frecuencia Vs Cm^3/s 53
Fig. 22 Acoplamiento Transmisor de Nivel a tanque de agua caliente 56
Fig. 23 Cableado Modulo entradas Análogas [14]. 56
Fig. 24 Cableado Transmisor de nivel Rosemount 57
Fig. 25 Instalación Termocupla tipo J 57
Fig. 26 Transmisor Tipo J. 58
Fig. 27 Instalación de Resistencia Calefactora y sensor de nivel ON_OFF 59
Fig. 28 Válvula manual Fig. 29 Taque con indicadores. 60
Fig. 30 Linealización Sensor de Nivel para Altura. 61
Fig. 31 Linealización Sensor de Nivel Para Volumen 61
Fig. 32 Histéresis 64
Fig. 33 Linealización sensor de Temperatura 65
Fig. 34 Creación de un nuevo Proyecto 68
Fig. 35 Configuración Driver 68
Fig. 36 Confirmación Driver. 69
Fig. 37 Asignación de IP. 69
Fig. 38 Verificación Controlador 70
Fig. 39 Buscar Modulo Entradas Análogas. 70
Fig. 40 Buscar Modulo Entradas Análogas. 71
Fig. 41 Asignación de nombre al módulo de entradas análogas. 71
Fig. 42 Configuración de Canales. 72

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Fig. 43 Creación Nuevo Proyecto Factory Talk View 72
Fig. 44 Creación Nuevo Proyecto 73
Fig. 45 Comunicación con Controlador Compact Logix 73
Fig. 46 Selección panel View 74
Fig. 47 Datos Trend 75
Fig. 48 Vaciado de tanque real 75
Fig. 49 Diagrama de Bloques Tanque Simulink. 76
Fig. 50 Configuración tanque Simulado 77
Fig. 51 Vaciado tanque Simulado 77
Fig. 52 Señales Superpuestas. 78
Fig. 53 Caudal de salida experimental. 79
Fig. 54 Tanque por Ecuación 79
Fig. 55 Graficas Superpuestas ecuación 80
Fig. 56 Función Lookup Table 81
Fig. 57 Modelo Bomba Simulink 81
Fig. 58 Modelo Sensor Nivel Simulink 82
Fig. 59 Modelo General Sistema. 82
Fig. 60 Análisis Térmico. 83
Fig. 61 Modelo Térmico. 84
Fig. 62 Modelo General Térmico 85
Fig. 63 Señal Cuadrada, Seudo 85
Fig. 64 Estimación Seudo Ident Matlab 86
Fig. 65 Ecuación forma paralela PIDE rslogix5000 [18]. 87
Fig. 66 Función de Transferencia C 89
Fig. 67 Función Transferencia C1. 90
Fig. 68 Bloque PIDE 91
Fig. 69 Limitar Variable de Control CV. 92
Fig. 70 Ingreso de constantes PID 92
Fig. 71 Modelo Global PID Simulado 93
Fig. 72 Control ON_OFF 94
Fig. 73 Simulación Control On_Off 94
Fig. 74 Pantalla Principal 95
Fig. 75 Interfaz y Trend de Nivel 96
Fig. 76 Interfaz y Trend de Temperatura. 96

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Lista de Tablas

Tabla 1 Tipo de modelos Paramétricos. [12] 44
Tabla 2 Tabla de Configuración Modulo 1769-IF4 [14] 48
Tabla 3 Comportamiento Bomba 52
Tabla 4 Especificaciones Transmisor Tipo J 58
Tabla 6 Valor medido altura 62
Tabla 7 Factor correlación (Nivel) 63
Tabla 8 Exactitud (nivel) 63
Tabla 9 Histéresis (Nivel) 65
Tabla 10 Valor medido Temperatura 66
Tabla 11 Factor Correlación Temperatura. 66
Tabla 12 Exactitud Temperatura 66

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

1. Introducción

En la actualidad las industrias consideran la automatización de procesos fundamental para garantizar la calidad del producto y eficiencia del proceso, como por ejemplo, controlar nivel y temperatura de diferentes tipos de líquidos, gases vapores etc., lo cual es común en la industria. Los sistemas de control ofrecen un nivel de seguridad durante el desarrollo y obtención del producto final permitiendo garantizar la ejecución de procesos en la industrial tales como manufactureras, alimenticias, comerciales entre otras.

La PPA, se desarrolló como requisito en la materia de Instrumentación de Procesos II en el noveno semestre del Programa de Ingeniería en Control y en colaboración con los equipos del Programa de Ingeniería en Producción de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, con el fin de preparar a estudiantes de ambos proyectos curriculares para el aprendizaje teórico-práctico de materias enfocadas a procesos industriales, automatización, instrumentación y control. El proyecto surge de la necesidad de tener plantas didácticas que permitan emular procesos reales y ver el comportamiento de las variables, para el aprendizaje de los conceptos y aplicaciones con relación a la carrera de ingeniería de control y carreras afines.

El Proyecto “Diseño e implementación de un sistema SCADA para el control de nivel y temperatura del tanque de agua caliente de la planta de procesos análogos (PPA)”, solo es una parte del modelado y la instrumentación de la PPA, y queda sujeto a futuras modificaciones que podrían ser la implementación de controladores basados en sistemas inteligentes y permitiendo la comparación con los sistemas de control convencionales para el desarrollo de prácticas.

Este proyecto se enfoca en el tanque de agua caliente de la PPA, en el desarrollo de algoritmos de control PID de nivel y control ON_OFF de temperatura con interacción al usuario mediante la pantalla HMI.

El modelo desarrollado cuenta con las características de un sistema real, condiciones óptimas de funcionamiento y el cual se ejecuta en el PLC (compac logix 500) y a través de la pantalla HMI.

Los pasos de la aplicación, y realización de las prácticas permiten al estudiante entender el comportamiento de ciertos procesos y se espera que mediante estas prácticas, puedan complementar sus estudios y abordar diferentes tipos de algoritmos y sistemas de control.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

1.1 Planteamiento del Problema

En el laboratorio Especializado Sistema Altamente Automatizado de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, cuenta con una planta didáctica que recibe el nombre de Planta de Procesos Análogos (PPA), para el aprendizaje teórico-práctico de materias enfocadas a procesos industriales, automatización instrumentación y control. Sin embargo, el tanque de agua caliente de la PPA no contaba con elementos que permitiera la medición de las siguientes variables; nivel y temperatura, ni con una interfaz humano maquina (HMI) para la supervisión y control, permitiendo realizar control sobre las variables ya mencionadas.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos General

Diseñar un sistema de control PID de nivel y control ON_OFF de temperatura para el tanque de agua caliente de la Planta de Procesos Análogos (PPA), con interacción al usuario mediante pantalla HMI.

1.2.2 Objetivos Específicos

Seleccionar e implementar un sensor para medir Nivel y Temperatura.

Realizar montaje, instalación y acoplamiento de sensores y resistencia.

Identificar las características, comportamiento del sistema para realizar el modelo del tanque de agua caliente.

Diseñar e implementar un sistema de control PID para el control de nivel y control ON_OFF de temperatura en el tanque de agua caliente.

Diseñar sistema SCADA de interacción usuario-planta mediante HMI.

Efectuar pruebas y correcciones que se requieran al sistema de control.

Implementación y elaboración de dos prácticas demostrando el correcto funcionamiento.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

2 Marco de Referencia

2.1. Antecedentes

Actualmente, el Laboratorio Altamente Automatizado HAS, perteneciente al proyecto curricular de Tecnología e Ingeniería Industrial cuenta con la planta didáctica de procesos análogos (PPA), la cual se desarrolló con un grupo de estudiantes para la asignatura Instrumentación de Procesos II impartida en el proyecto curricular de Ingeniería en Control, la cual se proyectó para la realización de actividades prácticas de programación, diseño, análisis, e implementación en asignaturas afines al control, instrumentación, automatización y procesos. Que permitan a los estudiantes emular procesos reales industriales para complementar sus estudios con sistemas didácticos. Sin embargo, la PPA no contaba con las condiciones propicias para desarrollar sesiones de laboratorio, principalmente debido al no contar con elementos de medición que permitan realizar lazos de control.

Con base a la tesis “MODULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS.”, punto de partida que permitió realizar las acciones de control, mediante un sensor de presión diferencial, determinando la presión de la columna del líquido y que proporciona una salida que permite determinar el nivel del líquido en el tanque [1].

Del documento para la revista IEE, “MODELING FOR LIQUID-LEVEL CONTROL SYSTEM IN BEER FERMENTATION PROCESS” obtener el modelo utilizando el método del modelo determinista ARX y modelo ARMAX permitiendo identificar según criterio de información [2].

Como guía para la realización de un sistema SCADA, sobre pantalla HMI la tesis “DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL SISTEMA SCADA FACTORY TALK VIEW DE ALLEN BRADLEY A UNA MAQUINA PROTOTIPO DE EMBALAJE EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACION DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA” la cual realizaron la automatización de dos prototipos que fueron desarrollados por estudiantes de pregrado, para la supervisión de sus variables de control en plataforma de hardware y software Allen Bradley [3].

Como fuente del modelamiento del sistema y la linealidad de sistemas no lineales el documento de revista electrónica “ESTABILIDAD DE SISTEMAS NO-LINEALES: SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDOS DE DOS TANQUES INTERCONECTADOS.” que permitieron determinar las características y metodología de análisis de estabilidad para sistemas no lineales [4].

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

3. Metodología

3.1 Marco Teórico

3.1.1 Sistemas De Niveles Líquidos.

En los sistemas de nivel, los cuales dependen del análisis de flujo de los líquidos y sus propiedades físicas, permiten caracterizar, determinar y distinguirlos de otros. Para el análisis existen dos tipos de flujos (Laminar o Turbulento) en la Figura. 1 y 2, se muestra tipo de flujo.

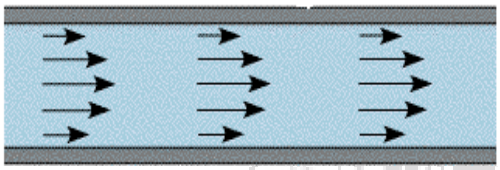


Fig. 1: Flujo Laminar

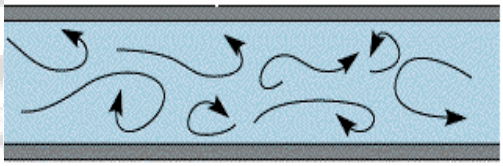


Fig. 2 Flujo Turbulento

En los sistemas que implican flujo de líquido a través de válvulas y tubos de interconexión de tanques, presentan flujo turbulento.

Su clasificación viene dado de acuerdo al número de Reynolds. El número de Reynolds es una cifra adimensional que se utiliza para definir las características de un flujo dentro de un conducto. En (1) se muestra el número de Reynolds (Re).

$$Re = \frac{v.d.h}{u} \tag{1}$$

$$V = Vm = V/2[m/s]\ ;$$

Nota. Vm, se define como la velocidad uniforme sobre toda la sección del tubo, en (2) se muestra la fórmula de velocidad media.

$$dh = Diámetro\ Hidráulico$$

$$u = Viscosidad\ cinética\ en \frac{m^2}{s}$$

Re critico <2300, valido para tubos redondos, rectos y lisos.

Flujo Laminar Re < Re crítico.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Flujo Turbulento Re > Re crítico.

$$Vm = \frac{\Delta p.\, d^4}{40.7ul} \tag{2}$$

- $\Delta p = diferencia\ de\ presión$
- $d = Diámetro\ de\ la\ tuberia$
- $u = Viscosidad\ del\ fluido$
- $l = longitud\ de\ la\ tuberia$

Resistencia, Sistema Nivel Líquido

La resistencia **R** para el flujo del líquido está definida como el cambio necesario en la diferencia de nivel líquido para producir un cambio de una unidad en la velocidad del flujo. [5] En (3) se muestra la resistencia para el flujo del líquido.

$$R = \frac{Cambio\ en\ la\ diferencia\ de\ de\ nivel}{cambio\ en\ la\ velocidad\ de\ flujo}\ [\frac{m}{\frac{m^3}{s}})] \tag{3}$$

Considerando el sistema de la Figura 3. Sistema Nivel Líquido, en la cual sale el líquido a chorros a través de la válvula con resistencia (R).

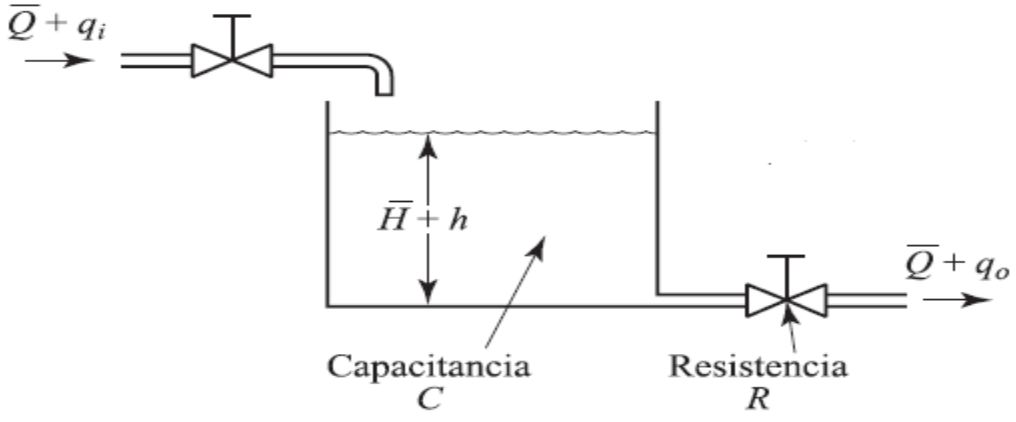


Fig. 3 Sistema Nivel Líquido [5]

- Caso 1. Flujo Laminar (Sistema lineal)

  La resistencia se obtiene, en la ecuación (4), Relación de velocidad de flujo en estado estable y la altura en estado estable.

$$Q = K * H \tag{4}$$

  Dónde:

- $Q = Velocidad\ de\ flujo\ de\ liquido\ en\ estado\ estable. [\frac{m^3}{s}]$
- $K = Constante\ [\frac{m^2}{s}]$
- $H = altura\ en\ estado\ estable\ [m]$

En (5), la resistencia (R), para el caso laminar está dada por;

$$R = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q} \tag{5}$$

La ecuación diferencial que representa este sistema es (6), ecuación diferencial fluido laminar.

$$Cdh = (q1 - q0)dt$$

A partir de la definición de la resistencia, la relación q0 y h en flujo laminar se obtiene en (6) y (7) del modelo dinámico.

$$q0 = \frac{R}{h} \tag{6}$$

$$q1(t) - \frac{h(t)}{R} = \frac{Cdh(t)}{dt} \tag{7}$$

Aplicando transformada de Laplace

$$q1(s) - \frac{h(s)}{R} = CSh(s) \rightarrow \frac{Rq1(s) - h(s)}{R} = CSh(s)$$

$$Rq1(s) = h(s) + RCSh(s) \rightarrow Rq1(s) = h(s)(1 + RCS)$$

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Como $G(s) = \frac{H(s)}{Q(s)}$, entonces la Función de transferencia (FT) para fluido laminar está dada por (8):

$$FT = G(S) = \frac{H(S)}{Q(S)} = \frac{R}{RCS + 1} \tag{8}$$

- Caso 2. Flujo turbulento (Sistema no lineal)

  Si el flujo es turbulento a través de la restricción, la velocidad del flujo en estado estable se obtiene la ecuación (9).

$$Q = K\sqrt{H} \tag{9}$$

  Dónde:

- $Q = Velocidad\ de\ flujo\ de\ liquido\ en\ estado\ estable.\ [\frac{m^3}{s}]$
- $K = Coeficiente\ [\frac{m^{2.5}}{s}]$
- $H = altura\ en\ estado\ estable\ [m]$

En (10), la resistencia (R), para el flujo turbulento está dada por;

$$R = \frac{dH}{dQ} \rightarrow dQ = \frac{K}{2\sqrt{H}} dH$$

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{K} = \frac{2H}{Q}$$

$$R_1 = \frac{2H}{Q} \tag{10}$$

La mayoría de los sistemas físicos de importancia práctica tienen un comportamiento no lineal, la caracterización de un sistema dinámico para obtener la función de transferencia puede ser hecha solo para sistemas lineales, sin embargo estos se pueden linealizar limitando su comportamiento, mediante expansión de serie de Taylor. [6]

El análisis del sistema ver Figura 3. Para un flujo turbulento.

$$Cdh = (q1 - q0)dt$$

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

A partir de la definición de la resistencia, la relación q0 y h en flujo turbulento se obtiene (11) y (12).

$$q0 = R\sqrt{h} = R(h)^{\frac{1}{2}} \tag{11}$$

$$q1(t) - R\sqrt{h} = \frac{Cdh(t)}{dt} \tag{12}$$

Aproximando la ecuación diferencial (13) a una función (14).

$$q1(t) - Rh = f(q1, h) \tag{13}$$

Realizamos expansión serie de Taylor a la ecuación diferencial (13).

$$f(q1, h) = f\left(\overline{q1}, \overline{h1}\right) + \frac{df}{dq1}_{|\overline{q1}, \overline{h1}} \Delta q1 + \frac{df}{dqh}_{|\overline{q1}, \overline{h1}} \Delta h$$

$$f(q1, h) = q1 - R\sqrt{h} \cong \overline{q1} - R\sqrt{h} + \Delta q1 - \frac{1}{2}\frac{R}{\sqrt{h}}_{\overline{q1}, \overline{h1}}$$

$$f(q1, h) \cong q1 - R\sqrt{h} + \Delta q1 - \frac{1}{2}\Delta h$$

$$f(q1, h) = C\frac{dh}{dt} \quad ; \quad C\frac{dh}{dt}_{\overline{q1}, \overline{h1}} = \overline{q1} - R\sqrt{\bar{h}}$$

$$C\frac{d\Delta h}{dt} = \Delta q1 - \frac{R}{\sqrt{\bar{h}}}\Delta h$$

(14)

$$\Delta q1 = q1 - \bar{q}1 \tag{15}$$

$$\Delta h = h - \bar{h} \tag{16}$$

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Sustituyendo las (15) y (16) en modelo dinámico (7). Obtenemos (17), en estado estacionario, el flujo de entrada igual al flujo de salida del tanque.

$$q1 - \bar{q}1 - \frac{h - \bar{h}}{R} = C\frac{dh}{dt}$$

$$si \quad \Delta q1 = Q = q1 - \bar{q}1 \quad y \quad \Delta h = H = h - \bar{h}$$

Aplicando Transformada de Laplace.

$$CSH(s) + \frac{H(s)}{R} = Q(s)$$

Como $G(s) = \frac{H(s)}{Q(s)}$ entonces la Función de Transferencia (FT) para fluido turbulento es (17):

$$H(s) = \left(CS + \frac{1}{R}\right) = Q(s) \rightarrow \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{1}{CS + \frac{1}{R}} = \frac{R}{CSR + 1} = \frac{R}{\tau s + 1}$$

$$donde\ \tau = RC$$

(17)

Se observa que la función de trasferencia (17) es idéntica en forma a (8), sin embargo en este caso la resistencia R depende de las condiciones de estado estacionario alrededor de las cuales el proceso opera.

La capacitancia C de un tanque se define como el cambio necesario en la cantidad del líquido almacenado, para producir un cambio de unidad en el potencial (altura). (El potencial es la cantidad que indica el nivel de energía del sistema).

Debe señalarse que la capacidad en m^3 y la capacitancia en m^2, son diferentes. La capacitancia del tanque es igual a su área transversal. Si esta es constante, la capacitancia es constante para cualquier altura. [5]

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

$$C = \frac{Cambio\ en\ el\ liquido\ almaenado, m^3}{cambio\ en\ la\ altura, m}$$

(18)

3.1.2 Sistemas térmicos

Los sistemas térmicos son aquellos que involucran la transferencia de calor de una sustancia a otra. Estos sistemas se analizan en términos de resistencia y capacitancia [5].

- R= Valor de la resistencia depende del modo en que se transfiere el calor.

El flujo de calor neto depende si existe una diferencia de temperatura entre ellos. Si q es la razón de flujo de calor y T1-T2, la diferencia de temperatura, en (19) se muestra razón de flujo de calor q.,

$$q = \frac{T2 - T1}{R} \tag{19}$$

- La capacitancia térmica es el almacenamiento de la energía interna en un sistema, si la razón de flujo de calor en el interior de un sistema es q1 y la razón de flujo de calor que sale es q2, entonces

$$La\ Tasa\ de\ cambio\ de\ energía\ interna = q1 - q2$$

Un incremento de la energía interna significa un incremento de la temperatura, es decir que,

- Cambio de la energía interna = masa*capacidad calorífica*cambio de temperatura en las (20 y 21) se muestra la tasa de cambio de energía.

- $m = masa$
- $c = capacidad\ calorífica\ específica$

$$q1 - q2 = \frac{mcdT}{dt} \tag{20}$$

- $mc = Capacitancia\ térmica\ C$ entonces

$$q1 - q2 = \frac{CdT}{dt} \tag{21}$$

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Resistencia Calefactora

Las resistencias caloríficas permiten que exista transferencia de calor sobre un líquido, como el líquido de la PPA es agua, se opta por las resistencias de tipo

tubular y sumergible. Se debe elegir la resistencia para calentar cierto volumen de agua, basados en principios de termodinámica para transferencia de calor [7]. (22) ecuación energía calorífica.

$$\Delta Q = mc\Delta T \tag{22}$$

Dónde:

$\Delta Q = Variacion\ energía\ calorífica.$

$m = masa\ del\ agua$

$c = calor\ especifico\ del\ agua.$

$\Delta T = Variación\ de\ temperatura$

Ver (23), densidad del agua.

$$\rho = \frac{m}{v} \tag{23}$$

Dónde:

$\rho = Densidad\ del\ agua.$

$m = masa\ del\ agua.$

$v = volumen\ del\ agua.$

3.1.3 Ecuaciones Generales Sistema

El volumen en función del área y la altura, está dado por (24).

$$V = A_T h \tag{24}$$

Donde

A_T=Área Transversal de tanque.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

h = altura del tanque.

El volumen de agua almacenado en función del caudal en el tanque se expresa en (25).

$$V = \int (Q_e - Q_s) dt \tag{25}$$

Donde;

V, es el volumen,

Qe, es el caudal de entrada al tanque,

Qs, es el caudal de salida del tanque,

dt, es el diferencial de tiempo.

Al, despejar (24) en (25), se obtiene;

$$A_T h = \int (Q_e - Q_s) dt$$

Despejando h y derivar respecto al tiempo entonces (26), derivada de la altura en función del caudal.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_e - Q_s}{A_T} \tag{26}$$

El caudal de salida del tanque está dado por (27), muestra caudal de salida.

$$Qs = A\sqrt{2gh} \tag{27}$$

Donde;

A= Área del Orificio de salida

g = gravedad

h= atura del tanque.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

3.1.3 Sensores

Sensor por Presión Diferencial

El nivel de un líquido es proporcional a la presión en el fondo y es independiente del volumen del líquido o a la forma del recipiente. El sistema no mide el nivel del líquido sino la presión ejercida por este y, como la presión es proporcional a la altura de la columna del líquido, es posible calcular el nivel en el recipiente.

Medición del nivel a tanque abierto, significa que el tanque está abierto a la atmósfera. En aplicaciones de tanque abierto, cualquier cambio en la presión atmosférica afecta a la presión del fluido de proceso dentro del tanque. En este tipo de medición de nivel, el trasmisor compara la presión en el tanque con la presión atmosférica, cancelando así los efectos de la presión atmosférica sobre en el nivel de líquido del tanque. Figura 4. Muestra la medición de nivel tanque abierto [8].

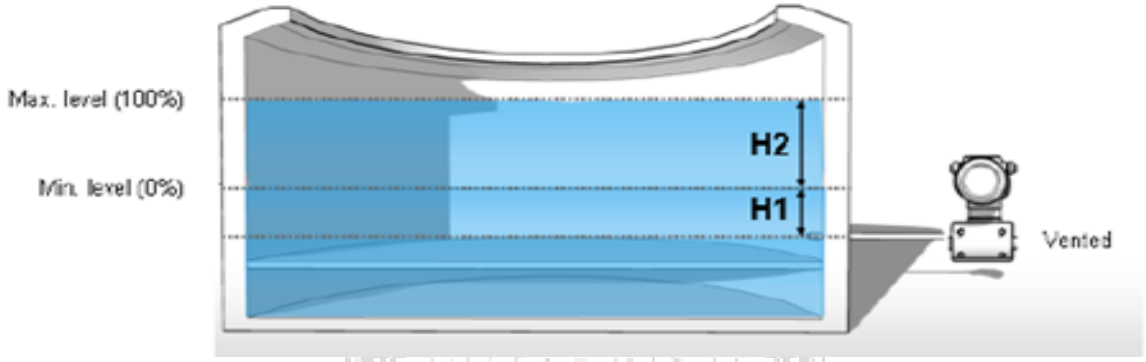


Fig. 4 Medición de nivel tanque abierto [8]

Para calcular la presión en la parte inferior del tanque es necesario conocer el valor de 'h1' en cm o pulgadas, Figura 5 muestra relación del cálculo de presión. Por ejemplo, si es 'h1' 14", y el líquido en el tanque es agua, entonces podemos expresar la presión en la parte inferior como 14" H20.

Pero si el líquido en el tanque no es agua, debe hacerse una conversión para especificar en "H20, (28) muestra el cálculo si el líquido no es H2O:

$$h = (h") \; x \; (SG) \tag{28}$$

Dónde:

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

- $h = máximo\ líquido, H20$
- $h" = máximo\ líquido\ reales, en\ pulgadas$
- $SG = gravedad\ específica\ (adimensional)\ del\ líquido\ en\ el\ tanque$

Gravedad específica (SG) es el peso relativo de una unidad de volumen de líquido en comparación con el mismo volumen de agua. Gasolina, por ejemplo, tiene una SG de aproximadamente 0,8. Por lo tanto, un litro de gasolina pesa 8/10 o el 80% del peso de un litro de agua. En consecuencia, cuando se especifica la presión de la columna de líquido en un tanque, es necesario identificar el líquido y obtener su SG.

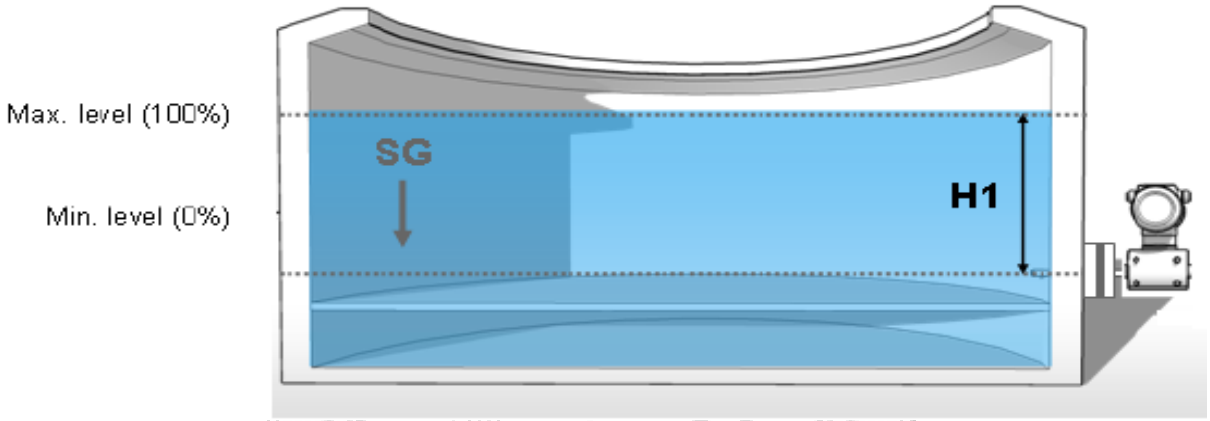


Fig. 5 Relación, Calculo de la Presión [8]

Sensor de Nivel ON_OFF

El sensor envía un pulso cuando el nivel del líquido alcanza el sensor, de lo contrario permanecerá sin activarse, según sea el caso, es ideal hasta temperaturas de 125 ° C. Figura 6. Muestra Sensor de nivel ON_OFF.



Fig. 6 Sensor de Nivel ON_OFF

UNIVERSITARIA
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Sensor Termopar

Los sensores de temperatura son dispositivos que transforman los cambios de temperatura en cambios en señales eléctricas.

El termopar, también llamado termocupla; recibe este nombre por estar formado por dos metales, es un instrumento de medida cuyo principio de funcionamiento es el efecto termoeléctrico. Un material termoeléctrico permite transformar directamente el calor en electricidad, o bien generar frío cuando se le aplica una corriente eléctrica.

3.1.4 Transformada Z

La transformación al dominio de z, permite un análisis de sistemas lineales e invariantes en el tiempo con la relativa facilidad. La transformada Z se utiliza para sistemas en tiempo discreto, al considerar la transformada Z de una función del tiempo x(t). Solo se toman los valores muestreados de x(t); x(0), x(T), x(2T) donde T es el periodo de muestro.

La transformada Z de una función del tiempo x(t), donde t es positivo, o de la secuencia de valores x(kT) donde k adopta valores de cero o enteros positivos y T es el periodo de muestro, se define mediante [9].

3.1.5 Sistemas de control.

Un sistema se puede definir como un sistema que reciben una entrada y con base en esta refleja una salida. Este se caracteriza por tener elementos de control que permiten realizar un control sobre un sistema, es decir conseguir dominio sobre las variables de salida dependiendo de los datos obtenidos por sus elementos de medición.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSE DE CALDAS

Sistemas de Control Tiempo Discreto

Un sistema en tiempo discreto es un operador matemático que transforma una señal en otra por medio de un grupo fijo de reglas y funciones. La notación T [.], es usado para representar un sistema general, tal como se muestra en la Figura 7. En el cual, una señal de entrada x(n) es transformada en una señal de salida y(n) a través de

la transformación T[.]. Las propiedades de entrada-salida de cada sistema puede ser especificado en algún número de formas diferentes [10].

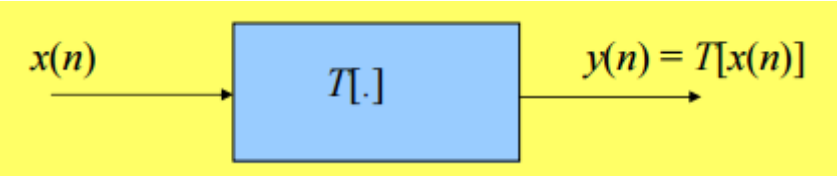


Fig. 7 Sistema General en tiempo discreto [10]**.**

Los sistemas de control en tiempo discreto toman muestras de los datos en determinado tiempo, fuera de estos tiempos el sistema no tiene información alguna del proceso controlado, estos se encuentran en forma de pulsos digitales, cuando se habla de un sistema de control digital se hace la referencia a la utilización de un sistema de procesamiento, es decir, PLC, DCS, Computador etc.

3.1.6. Controladores.

Controlador ON_OFF

Es la forma más simple de un control de realimentación, este controlador es utilizado en algunas industrias, es un control de dos posiciones en el que el elemento final del control solo ocupa una de las dos posibles posiciones, lo que indica que las salidas nuestro controlador va estar a un extremo a otro cuando este varía de la posición dada.

VENTAJAS

- Es la forma más simple de control
- Bajo precio de instalación
- Fácil instalación y mantenimiento
- Amplia utilización en procesos de poca precisión.

DESVENTAJAS

- Mínima precisión.
- No recomendable para procesos de alto riesgo

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Controlador PID

Este controlador es el más utilizado en las industrias, es un controlador por retroalimentación que calcula la desviación del error entre un valor medido y el que se quiere obtener, obteniendo una acción correcta del proceso ver Figura 8 Estructura Sistema SISO (una entrada una salida).

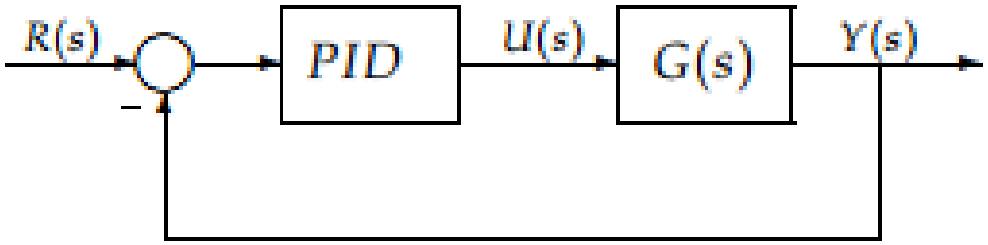


Fig. 8 Estructura Sistema SISO (una entrada una salida)

La estructura del controlador PID es simple y se basa en diferentes parámetros que se describen a continuación:

- **Constante Proporcional (Kp)**: da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir: $u(t) = KP.e(t)$, que descripta desde su función de transferencia, (34) :

$$Cp(s) = Kp\ (1) \tag{34}$$

Donde Kp es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set) [11].

- **Constante Integral (Ki):** da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = Ki \int_0^t e(\tau)d\tau \; Ci(s) = Ki\, s$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero [11]

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

- **Control Proporcional Integral (CPI).** se define mediante (35)

$$u(t) = Kpe(t) + \frac{Kp}{Ti}\int_0^t e(\tau)d\tau$$

Donde Ti se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$CPI(s) = Kp\,(1 + \frac{1}{Tis})$$

(35)

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control decreciente. Este razonamiento sencillo muestra que el error en régimen permanente será siempre cero [11].

- **Control Proporcional Derivativo (CPD).**

$$u(t) = Kpe(t) + KpTd\frac{de(t)}{dt}$$

Donde Td es una constante de denominada tiempo derivativa. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sı sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta. [11].como (36):

$$CPD(s) = Kp + sKpT$$

(36)

- **Control Proporcional Integral Derivativo (PID):** Esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante (37):

$$u(t) = Kpe(t) + Kp\,Ti\int_0^t e(\tau)d\tau + KpTd\frac{de(t)}{dt}$$

(37)

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Y su transferencia resulta (38).

$$CPID(s) = Kp\,(1 + \frac{1}{Tis} + Tds) \tag{38}$$

- **Control Proporcional Integral Derivativo Discreto (PID):** si se aproxima $S \cong \frac{z-1}{zT}$ y se reemplaza en la ecuación (39),La función de transferencia en tiempo discreto de un PID ideal es (40),

$$G_{PIDideal}(Z) = \frac{H(z)}{U(z)} = Kp\,(1 + \frac{1}{Ti}.\frac{z}{z-1} + \frac{Td}{T}.\frac{z-1}{z}) \tag{39}$$

$$H(z)(1 - z^{-1}) = U(z)(q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}) \tag{40}$$

Con lo cual la ecuación de diferencias es (41).

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \tag{41}$$

3.1.7 Métodos de identificación de sistemas

Técnicas de Identificación, Parámetros

Para la identificación de sistemas existen diferentes métodos, para identificar el comportamiento de sistemas algunos de los diferentes criterios son:

Método Paramétrica

En este método se hace una elección o aproximación a una posible estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales del sistema (entrada, salida y perturbaciones), debido a un amplio estándar de sistemas dinámicos que permiten describir el comportamiento de cualquier sistema lineal. Los modelos paramétricos se describen en el dominio discreto, estos modelos se basan en la obtención de

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

datos por muestreo que sirven de base para la identificación. En el caso que se requiere un modelo continuo, siempre es posible realizar una transformación del dominio discreto al continuo.

La expresión general de un modelo discreto es (42)

$$\mathrm{s(t)} = \mathrm{n(t)} + \mathrm{w(t)} \tag{42}$$

Donde

- *w(t)=* modela la salida debido a perturbaciones.
- *n(t)=* salida debido a la señal de entrada
- *s(t)=* salida medible del sistema.

En las siguientes ecuaciones se puede observar otra expresión para cada una de las variables anteriores (42.1), (42.2), (42.3).

$$n(t) = G(q^{-1}, \theta)u(t) \tag{42.1}$$

$$w(t) = H(q^{-1}, \theta)e(t) \tag{42.2}$$

$$S(t) = A(q^{-1}, \theta)y(t) \tag{42.3}$$

Donde

- *q^(-1)* = operador de retardo
- θ = vector de parámetros
- *u(t)* = entradas del sistema
- *e(t)* = ruido de la entrada.
- *y(t)* = salida de interés del sistema

En muchos casos, algunos de los polinomios descritos anteriormente no se incluyen en la descripción del modelo, dando lugar a los siguientes casos particulares [12].

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Tipo de Modelo	Condición	Estructura Resultante
ARX	$F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = C(q^{-1}) = 1$	$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})\mu(t) + e(t)$
Output error (OE)	$C(q^{-1}) = D(q^{-1}) = A(q^{-1}) = 1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} + e(t)$
ARMAX	$F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = 1$	$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})\mu(t) + C(q^{-1})e(t)$
Box Jekins (BJ)	$A(q^{-1}) = 1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}\mu(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t)$

Tabla 1 Tipo de modelos Paramétricos. [12]

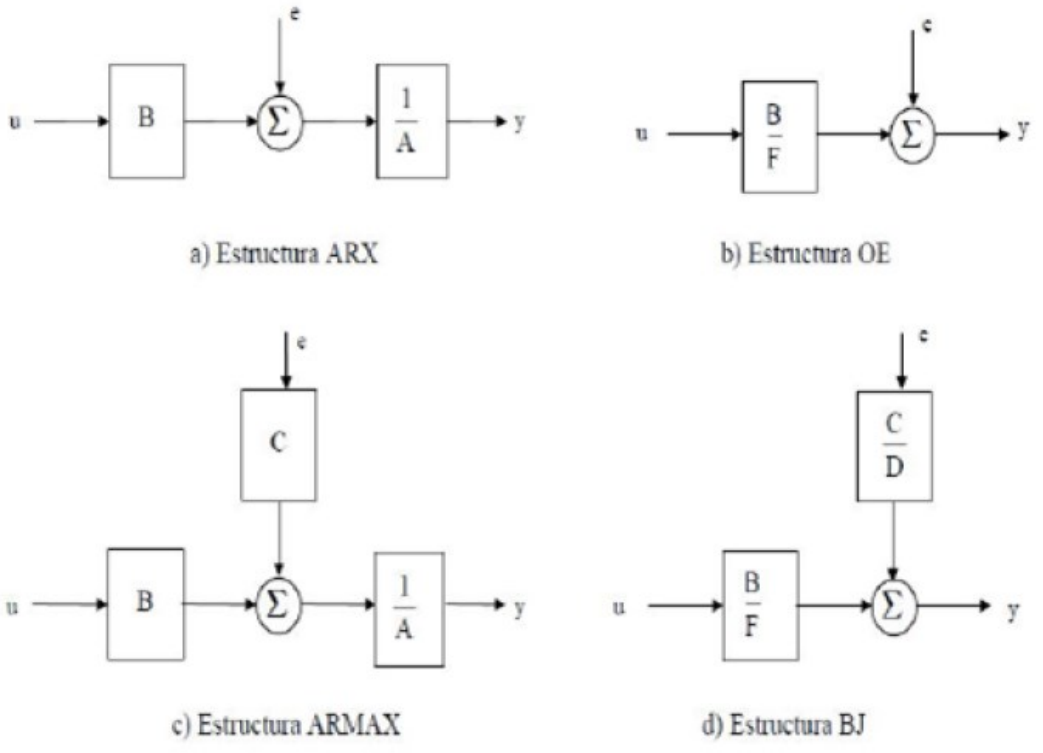


Fig. 9 Diagrama de bloques modelos paramétricos. [12]

3.1.8 Descripción de la planta y elementos

Planta de Procesos Análogos (PPA)

La PPA fue desarrollada en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica, por estudiantes de ingeniería de control en la asignatura Instrumentación de Procesos II, con los equipos suministrados del proyecto curricular de Tecnología Industrial e Ingeniería en Producción y el apoyo del laboratorio de Tecnología Industrial e Ingeniería de Producción con el fin de que los estudiantes realicen prácticas de procesos de control, instrumentación, procesos industriales, programación de autómatas (PLC), etc. Cuenta con la facultad de poder continuar los desarrollos y estudios aplicados a carreras como Ingeniería en Control, Ingeniería Industrial, Ingeniería Mecánica y demás carreras a fin que apoyen la posibilidad de futuros acoplamientos de diferentes plantas; procesos de dosificación, intercambiadores de calor, calderas y reactores entre otros.

La planta está conformada por una estructura metálica en el cual se encuentran tres tanques trasparentes de acrílico, cada uno con diferente volumen y forma, sistemas hidráulicos con válvulas manuales, un motor acoplado a una bomba, el cual permite la circulación de agua, sistema de refrigeración por medio de un radiador y un ventilador, sensores de ultrasonido, PT100, Termopares, sensores de presión diferencial, sensores tipo interruptor, y un tablero de control con sistemas de protección para los actuadores, con su cableado identificado, una HMI para la visualización e interacción de la planta, un variador de velocidad, sistemas de protección y alimentación.

Aplicando sistemas de control, toma de señales de diferentes sensores; el tratamiento y su trasmisión en ambientes industriales que brinda la PPA,

Las practicas disponibles en la PPA ofrecen la posibilidad de verificar el funcionamiento del proceso, la instalación y conexión de la totalidad de la instrumentación que la componen, y su modificación dependiendo de las necesidades que se presenten para el mejoramiento del funcionamiento y aprendizaje utilizando las opciones que ofrece el desarrollo tecnológico.

Como resultado se obtiene una planta de propiedad de la Universidad Distrital elaborada por la Universidad Distrital con la soberanía de modificarla, corregirla, mejorarla, hacer réplicas de ella sin tener restricciones por derechos de autor como sucede con plantas didácticas que se encuentran en el mercado, proporcionando al

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

profesional egresado como Ingeniero en Control de la Facultad Tecnológica un aprendizaje y entrenamiento para enfrentar los problemas que se puedan presentar en ambientes industriales, busca de soluciones en el sector productivo, soluciones tecnológicas, procesos de modernización de la industria que ofrece el mercado, obteniendo mayores herramientas para su desempeño en el campo industrial y su vida laboral.



Fig. 10 Planta de Procesos Análogos PPA

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

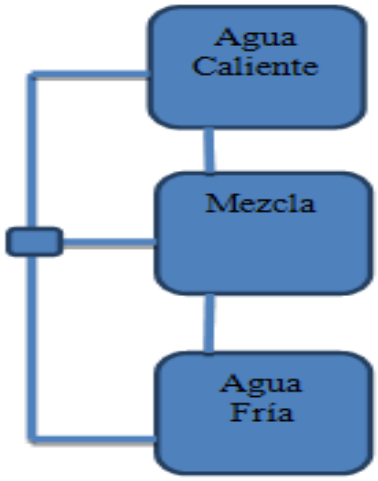


Fig. 11 Diagrama de bloques PPA.

Descripción PLC

Para la implementación del algoritmo de control el cual se desarrolló en un PLC de la empresa Allen-Bradley su serie 1769_L23E_QB1B, el cual posee 16 entradas y salidas digitales, puerto de comunicación Ethernet y serial [13], Figura 12 PLC de la PPA.

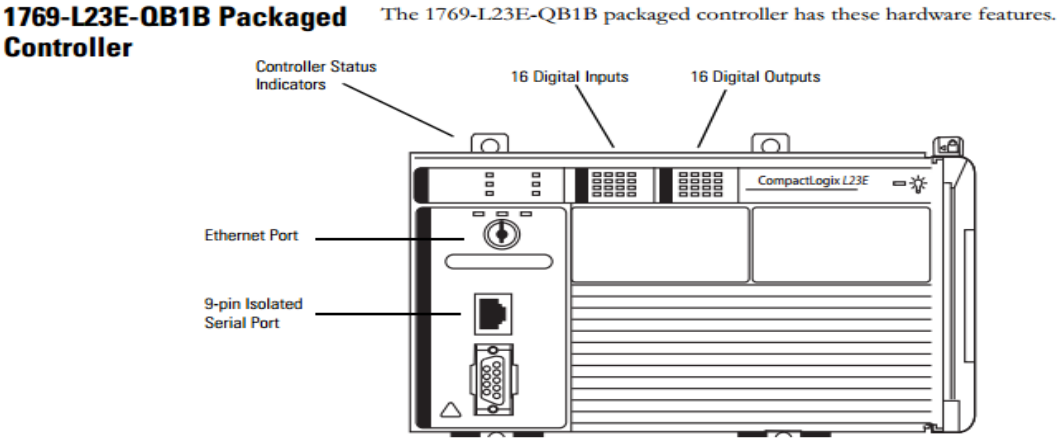


Fig. 12 PLC de la PPA

Descripción Modulo Entradas Análogas

Modulo que permite obtener los datos de nuestro transmisor de nivel y de temperatura, para poder realizar nuestro control. Figura 13, muestra modulo entradas análogas 1769-IF4 [14].

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSE DE CALDAS



Fig. 13 Modulo entradas análogas 1769-IF4

Defina	Para seleccionar	Configure los bits del siguiente modo												
		15	14	13	12	11	10	9	8	4-7	3	2	1	0
Selección de filtro de entrada/ Frecuencia de -3dB	60 Hz/15.7 Hz									No se usa	0	0	0	0
	50 Hz/13.1 Hz										0	0	0	1
	Se usa										0	0	1	0
	250 Hz/65.5 Hz										0	0	1	1
	500 Hz/131Hz										0	1	0	0
	Disponible[1]													
Tipo de entrada/ Rango	-10 a +10 VCC					0	0	0	0					
	de 0 a 5 VCC					0	0	0	1					
	de 0 a 10 VCC					0	0	1	0					
	de 4 a 20 mA					0	0	1	1					
	de 1 a 5 VCC					0	1	0	0					
	de 0 a 20 mA					0	1	0	1					
	Disponible[1]													
Formato de datos de entrada	Datos no procesados/ proporcionales		0	0	0									
	Unidades de ingeniería		0	0	1									
	Ajustado a PID		0	1	0									
	Rango de porcentaje		0	1	1									
	Disponible[1]													
Habilitar canal	Habilitado	1												
	Inhabilitado	0												

Tabla 2 Tabla de Configuración Modulo 1769-IF4 [14]

Descripción Pantalla HMI.

Pantalla donde se realizó la visualización y control mediante del tanque de agua caliente de la PPA. Figura 14. Muestra Pantalla HMI PLUS 600 de Allen-Bradley.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



Fig. 14 Pantalla HMI Plus 600 de Allen-bradley

Descripción Variador de CA de frecuencia ajustable Power Flex40:

Variador de velocidad que permite controlar nuestro actuador, Figura 16, muestra Actuaodor, para controlar la velocidad con la que el flujo llena el tanque, Figura 17 muestra Tanque de agua caliente de la PPA. En la Figura 15, se muestra Variador Power Flex40.



Fig. 15 Variador PowerFlex40

Descripción Actuador Motor-Bomba.

Elemento actuador que permite regular la velocidad con la que el flujo de agua llena el tanque. Figura 16, Muestra Actuador



Fig. 16 Actuador

UNIVE RITAL
FRANC CALDAS

Descripción Tanque Agua Caliente.

Tanque donde controlamos el nivel del agua y su temperatura. Figura 17 muestra Tanque de agua caliente de la PPA.



Fig. 17 Tanque de agua caliente de la PPA

4. Resultados.

4.1 Dimensionamiento tanque agua Caliente

El tanque de agua caliente que geometricamente es conocido como Prisma recto o papelipipedo recto posee las siguientes dimensiones, alto 44.4cm, ancho 25.5cm y largo 60cm. La Figura 18, muestra Dimensiones tanque de agua caliente.

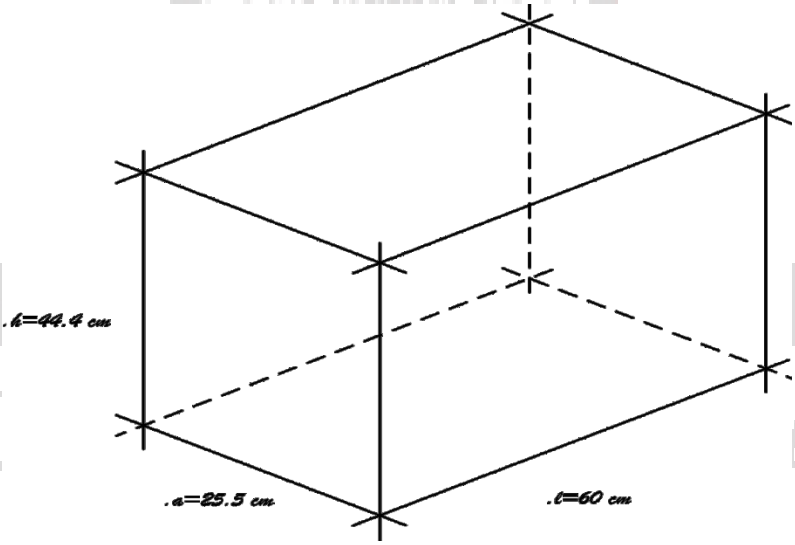


Fig. 18 Dimensiones tanque de agua caliente.

4.1.1 Volumen tanque (Matemáticamente)

$$h\ (Altura) = 44{,}4\ cm$$

$$a\ (Ancho) = 25{,}5\ cm$$

$$L\ (Largo) = 60\ cm$$

- $V(Volumen\ ) = L * a * h = (60\ cm * 25{,}5\ cm * 44{,}4\ cm)$

$$V = 67932\ cm^3$$

- $1\ Litro\ (L) = 1000\ cm^3$

$$67932\ cm^3 * \frac{1L}{1000\ cm^3} = 67{,}932\ Litros$$

Para efectos prácticos la medida en el tanque se estimó solo hasta los 60 Litros.

4.1.2 Volumen tanque (experimentalmente)

Para la medición del volumen en litros del tanque y corroborar con los cálculos realizados anteriormente descritos, se tomó una pipeta del laboratorio de física de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica para medir el volumen del tanque. Figura 19. Muestra Pipeta de 1 Litro de agua.



Fig. 19 Pipeta 1 litro de agua.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

4.1.3 Bomba

Para determinar cómo se comporta la bomba, hallaremos la función del caudal vs la frecuencia aplicada a esta desde el variador.

El primer parámetro en ser calculado es el área trasversal (At) de nuestro tanque, Ver Figura 18.

$$At = 60cm * 25cm = 1530\ cm^2 = 0.153\ m^2$$

La bomba se estimuló a diferentes rangos de frecuencia cada 20hz, empezando en 40hz teniendo en cuenta que es la frecuencia donde el tanque empieza a recibir agua y hasta el máximo permitido 60hz, mediante el software de programación Rslogix5000 se obtiene la evolución de nivel en litros del tanque para cada frecuencia, se exporto los archivos a Excel con el fin de tratarlos y obtener el caudal litros/min para cada una de las frecuencias, obteniendo el siguiente resultado , ver Tabla 3 Comportamiento Bomba.

HZ	Litros/min	litros/s	Cm^3/s
0	0	0	0
38	0	0	0
40	1.99514782	0.03325246	3.33E+01
42	3.511933186	0.05853222	5.85E+01
44	3.918411	0.06530685	6.53E+01
46	5.648829693	0.09414716	9.41E+01
48	7.11458354	0.11857639	1.19E+02
50	8.20703364	0.13678389	1.37E+02
52	8.99903457	0.14998391	1.50E+02
54	9.80399365	0.16339989	1.63E+02
56	10.70239848	0.17837331	1.78E+02
58	11.32219266	0.18870321	1.89E+02
60	12.16287096	0.20271452	2.03E+02

Tabla 3 Comportamiento Bomba

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

A continuación se realizó una regresión lineal, frecuencia vs Litros/min ver Figura 20. Y frecuencia Vs Cm^3/s Ver Figura 21.

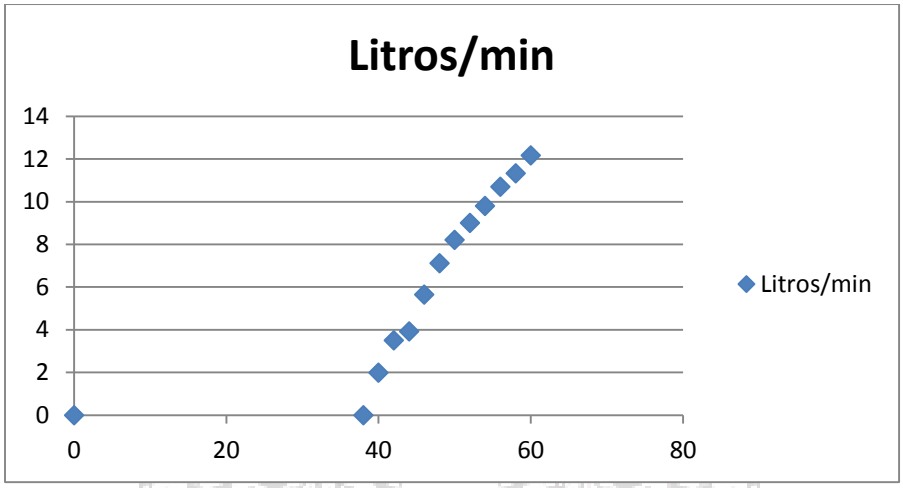


Fig. 20 Frecuencia Vs Litros/min

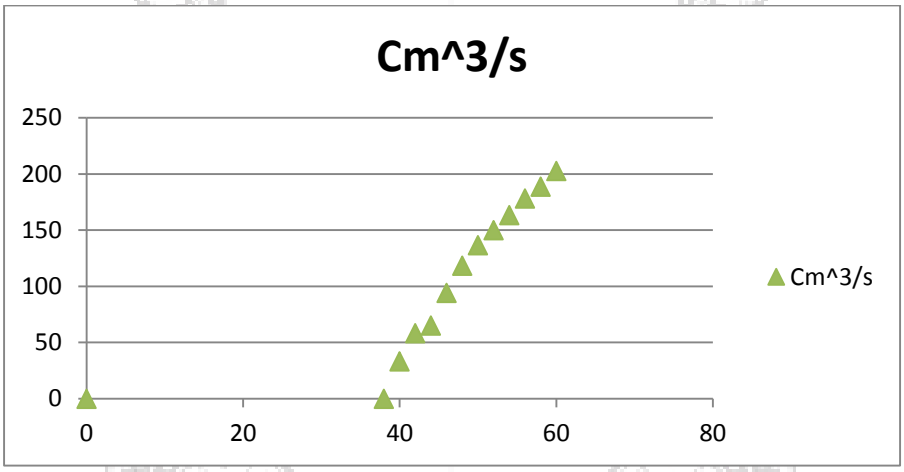


Fig. 21 Frecuencia Vs Cm^3/s

4.1.3 Selección de Sensores

Al momento de seccionar los sensores de nivel y temperatura se tuvo en cuenta la aplicación en la PPA, eligiendo aquellos que se integren de forma adecuada en la variable a medir con el fin que los estudiantes se familiaricen con la instrumentación de uso industrial, su funcionamiento, instalación, características, velocidad, tamaño, alcance de medición, el entorno en el cual funcionara el sensor, su costo y versatilidad en los diferentes sensores de la PPA.

Transmisor de nivel

Para la medición de nivel, los sensores que común mente se utilizan son los sensores ultrasónicos, capacitivos y tipo flotador. Se descartan los sensores de tipo

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

ultrasonido ya que el tanque de mezcla posee un sensor de este tipo y se busca el aprendizaje en diferentes tipos de sensores en la planta PPA, los sensores tipo capacitivo encontrados en el mercado son fabricados bajo características específicas y esto limita los posibles cambios, modificaciones o mejoras que se puedan hacer a futuro a la PPA. Los sensores de tipo interruptor no permiten efectuar una medición continua de nivel.

El sensor de nivel que se eligió es el Trasmisor de presión diferencial Rosemount 2051c, el cual realiza una medición a través de dos puntos, determinando la presión de la columna del líquido comparándolo con la presión atmosférica, su salida es una señal análoga y se superpone a la señal HART en salida 4-20mA. [15]

Este sensor tiene la opción de agregar una LCD para tener una lectura en campo de la medición que está efectuando. Este sensor permite a su vez medir caudal a través de su modo de operación efectuando los cálculos respectivos mediante la programación del dispositivo PLC.

Cuenta con certificaciones TIIS, GOST (Rusia), NEPSI (China); incombustible y seguridad intrínseca.

Este satisface las siguientes características

1. Robusto, tipo industrial,
2. Permite ajustar al rango de nivel, debido a la pequeña altura del tanque.
3. Permite ajustar protocolo de comunicación Hart.
4. Versatilidad en la medición de diferentes fluidos, aceites
5. Aplicaciones para caudales líquidos, gaseosos y vapor.
6. Tipos de medición, caudal, presión y nivel.

Sensor de Temperatura

Para la medición de temperatura en el tanque de agua de la PPA, los sensores tipo industrial que común mente se utilizan son los sensores Termopares o termocupla, RTD; PT 100, PT1000. Se descartan los sensores de tipo PT100 o PT1000 ya que el tanque de suministro posee un sensor de este tipo y se busca el aprendizaje en diferentes tipos de sensores en la planta PPA,

El sensor de nivel que se eligió es el termopar que es utilizado común mente a nivel industrial. La medición la efectúa a través de la unión de dos alambres de distinto material unidos en un extremo.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Dentro de la variedad de termopares se encuentran tipo J que se usan principalmente en la industria del plástico, goma (extrusión e inyección) y fundición de metales a bajas temperaturas como el aluminio, con temperaturas entre -180 °C y 750 °C. Las termocuplas tipo K se usa típicamente en la fundición y hornos aplica a temperaturas alrededor -180 °C - 1300 °C. Las termocuplas R, S, B, se usan casi exclusivamente en la industria siderúrgica (fundición de acero) con temperaturas de 0°C – 1800 °C.

Para la elección del sensor de temperatura se tuvo en cuenta el hecho de que el líquido en este caso el agua no se va a llevar a estado de ebullición y por tanto en la ciudad de Bogotá-Colombia no supera más de 92-93ºC, se optó por una termocupla tipo J, que se ajusta a los rangos de temperatura y de fácil calibración.

Para poder obtener la lectura del sensor de temperatura tipo J al módulo de entradas análogas, se compró un trasmisor de 4-20mA para dicho sensor. Ver Figura 28. Trasmisor Tipo J y Tabla 4 Especificaciones Transmisor tipo J. Este transmisor tiene el rango entre 0 y 400 C°, ventaja si en el futuro se adecua la planta para manejar temperaturas mayores a 97C°, para ello se deberá cambiar el tanque actual por uno que logre alcanzar y soporte este tipo de temperaturas.

Las especificaciones del transmisor para entrada tipo J, alimentado con un voltaje de 17v a 35v, transmite temperaturas de 0 °C a 400°C, con una salida de 4 a 20 mA, un error menor a 0.005%.

4.1.4 Instalación y Acoplamiento de Sensores

Instalación Transmisor de Nivel

Teniendo en cuenta que nuestro tanque se encuentra en una aplicación de tanque abierto a la atmosfera para el acoplamiento del trasmisor de nivel y el líquido (H2O), ingresa por la parte superior se opta por instalar en la parte inferior del tanque y teniendo en cuenta las recomendaciones [8] y según se observa en la Figura 2. Debido a la distancia del tanque con el armazón de la PPA se agregó una manguera de 15 cm entre el orificio del tanque el transmisor por presión diferencial. Figura 22. Muestra Acoplamiento Transmisor de nivel a Tanque de agua caliente.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



Fig. 22 Acoplamiento Transmisor de Nivel a tanque de agua caliente.

La conexión se realizó al módulo de entradas análogas Figura 13. Según [14] y teniendo en cuenta la variedad de modos de lectura en esta caso (Corriente (4-20mA) ver Tabla 2. La Figura23. Muestra la conexión del transmisor de nivel al módulo de entradas análogas según bloque transmisor de corriente. Figura 24. Muestra el cableado sobre el transmisor de nivel marca Rosemount.

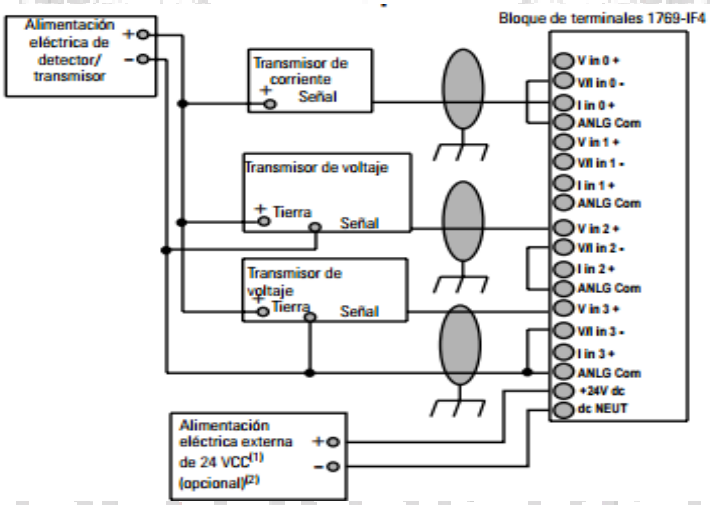


Fig. 23 Cableado Modulo entradas Análogas [14].

UNIVERSIDAD FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



Fig. 24 Cableado Transmisor de nivel Rosemount

Instalación Sensor de Temperatura

El sensor de temperatura se instaló en la parte superior de la cantidad máxima de agua que se va a calentar, 22 Litros. Ver Figura 25. Para poder determinar con exactitud la temperatura del agua y que no se viera afectada por la resistencia.



Fig. 25 Instalación Termocupla tipo J

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Para poder obtener la lectura del sensor de temperatura tipo J al módulo de entradas análogas, se compró un trasmisor de 4-20mA para dicho sensor. Ver Figura 26. Trasmisor Tipo J y Tabla 4 Especificaciones Transmisor tipo J. Este transmisor tiene

el rango entre 0 y 400 C°, ventaja si en el futuro se adecua la planta para manejar temperaturas mayores a 97C°, para ello se deberá cambiar el tanque actual por uno que logre alcanzar y soporte este tipo de temperaturas.

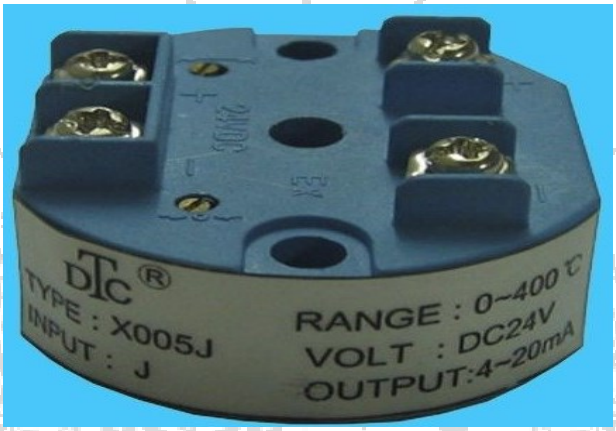


Fig. 26 Transmisor Tipo J.

DTC Transmitter Instruction Manual	
Input:	**J**
Volt:	**17 Vdc - 35Vdc**
Resistance:	**0-400 ˚C**
Output Dc:	**4-20mA**
Error:	**< 0.005%**
Accuracy:	**0.1% - 0.2%**
Power Consume:	**< 0.5W**
Working Environment Temperature:	**-20˚C - 80˚C**
Humidity	**< 59% RH**

Tabla 4 Especificaciones Transmisor Tipo J

Instalación de Resistencia de Calefacción.

Según (51), la potencia de la resistencia y el líquido del tanque a calentar, se instaló una resistencia de tipo tubular y sumergible. Adicionalmente se instaló un sensor de nivel ON_OFF ver Figura 6, como circuito de protección para poder encender la resistencia debido a que si no se encuentra sumergida en agua puede dañarse. Figura 27. Muestra instalación de la resistencia calefactora y del sensor de nivel ON_OFF.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



Fig. 27 Instalación de Resistencia Calefactora y sensor de nivel ON_OFF

4.1.5 Linealización de los Sensores

La linealización se realizó para obtener las ecuaciones características y así poder mostrar la lectura en la pantalla HMI desarrollada para el PLC.

Linealización Trasmisor de nivel

Para determinar la presión ejercida en nuestro tanque. Definimos nuestra altura máxima y teniendo en cuenta que nuestro liquido es agua, Figura 4. Entonces se obtiene:

$$h\ (Altura) = 40\ cm$$

Debido a que liquido usado es H20, entonces.

$$1\ in = 2{,}54\ cm$$

$$inH2O = \frac{40\ cm * 1in}{2{,}54\ cm} = 15{,}7480 = 15\ \frac{3}{4}\ In\ H2O$$

Para efectos prácticos el transmisor de calibro de 0 a 15 inH2O

$$0inH20 = 4\ mA$$

$$15inH2O = 20mA$$

Al instalar el transmisor de nivel ver Figura 22. Se llenó el tanque de agua, enseguida se abrió la válvula ver Figura 28. Muestra válvula manual tanque de agua

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

caliente, permitiendo que se desocupara el tanque observando el nivel cero de agua en el tanque, ya que la válvula no se encuentra al ras con la base del tanque y la distancia de la manguera entre el transmisor y el tanque, debido a esto se instalaron los visualizadores tanto de volumen (Litros) como de altura (cm), desde ese punto. Ver Figura 29. Muestra tanque con indicadores.



Fig. 28 Válvula manual

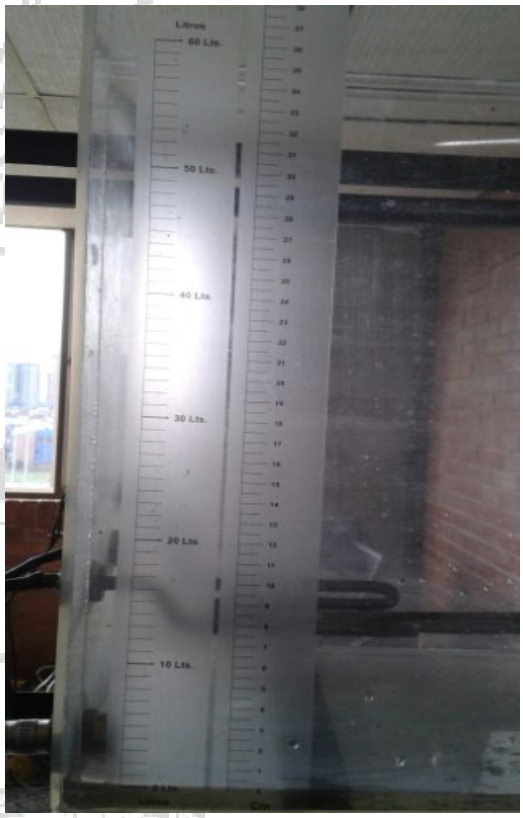


Fig. 29 Taque con indicadores.

Anexo 1 "Tabla A1.1 Sensor de Nivel (Volumen Vs Corriente) y (Altura Vs Corriente)", muestran la toma de datos de nivel (volumen y altura) que se realizaron con respecto a corriente en (mA). Se realizó regresión lineal a los datos obtenidos de tabla anteriormente mencionada para Cm y Litros respectivamente. Ver Figura 30. Linealización Sensor de Nivel Altura y Figura 31. Linealización Sensor de Nivel Volumen.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

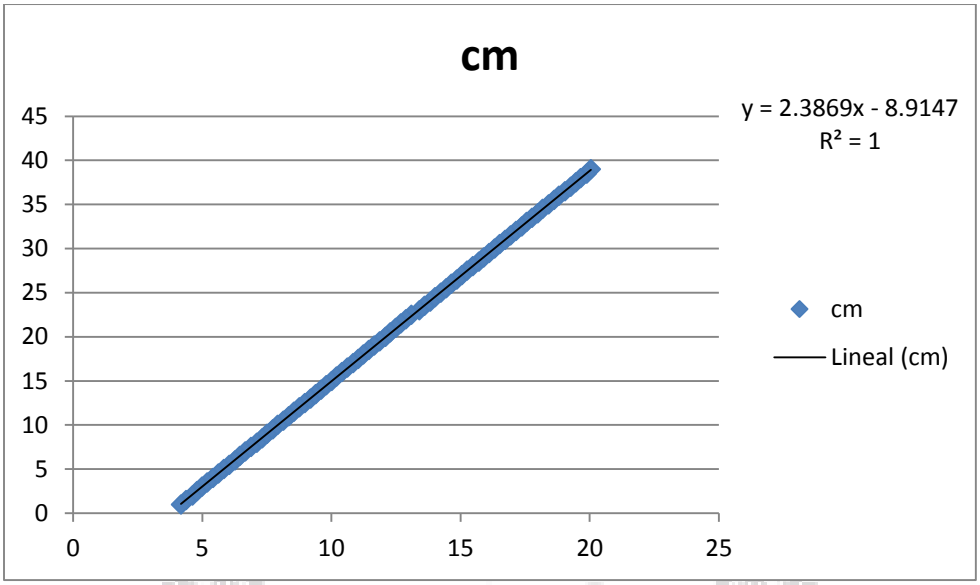


Fig. 30 Linealización Sensor de Nivel para Altura.

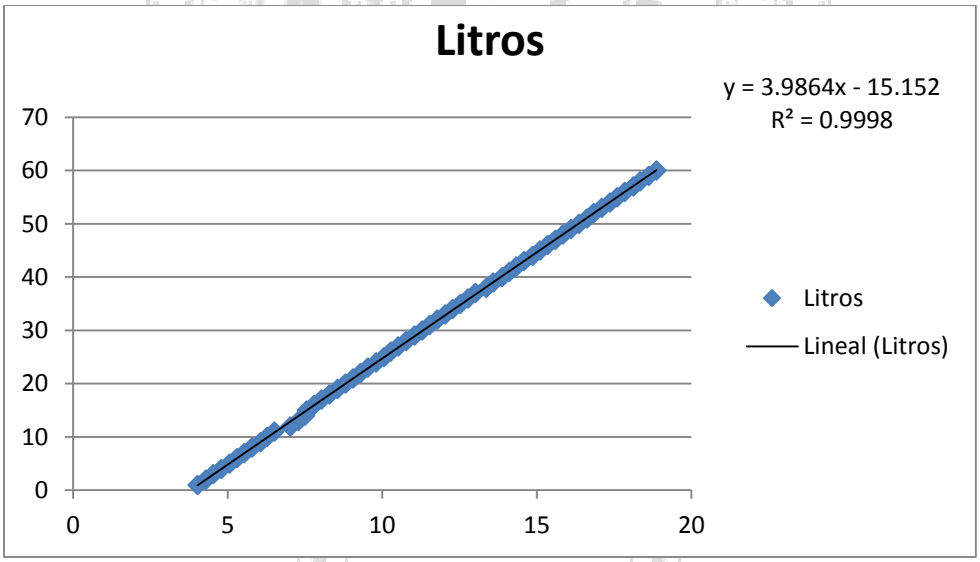


Fig. 31 Linealización Sensor de Nivel Para Volumen.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

En (43) valor promedio de las lecturas realizadas con el trasmisor de nivel

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_i = \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n} \quad (43)$$

N°	Valor medido centímetros					
	6 cm	12 cm	19 cm	26 cm	32 cm	39 cm
1	5.9900	11.99	19.06	26.07	32.15	39.18
2	5.9800	11.98	19.05	26.05	32.17	39.05
3	5.9600	11.97	19.04	26.05	32.16	39.12
4	5.9900	12.01	19.04	26.06	32.08	39.15
5	5.9800	12.01	19.08	26.1	32.02	39.16
6	6.0100	12.02	19.04	26.01	32.08	39.18
7	6.0000	11.96	19.01	25.99	32.1	39.15
8	5.9500	11.95	19.03	26.1	32.09	39.14
9	5.9800	11.99	19.05	26.05	32.12	39.16
10	6.0200	12.03	19.05	26.01	32.12	39.2

Tabla 5 Valor medido altura

En (44) el cálculo del error sistemático de vías, teniendo en cuenta los datos tomados en la tabla 5. Valor medido altura.

$$B = \frac{\bar{x} - x}{x_T} 100\% \tag{44}$$

Varianza experimental, en (45) y (46).

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_{i-} \bar{x})^2 \tag{45}$$

$$s = \sqrt{s^2} \tag{46}$$

Calculo de precisión, en (47)

$$S_P = t_{ST} S \tag{47}$$

Donde t_{ST} dependerá del número de mediciones que se hagan. La exactitud de un sensor en la capacidad de este para dar valores con pequeños errores (48). Estos pueden ser expresados de la siguiente manera.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

$$Acc = B \pm \sqrt{S_p^2 + \frac{s_p^2}{n}} \quad (48)$$

Factor de corrección para errores sistemáticos, en (49)

$$F_B = \frac{1}{1 + \frac{B}{100}} \quad (49)$$

cm	FB
6	0.97560976
12	0.9979044
19	0.99770528
26	0.99108028
32	0.97465887
39	0.97465887

Tabla 6 Factor correlación (Nivel)

cm	x	B	S	Sp	Acc+	Acc-
6	5.9860	2.5	0.021187	0.04720463	2.54950864	2.45049136
12	11.991	0.21	0.02643651	0.05890054	0.2717754	0.1482246
19	19.045	0.23	0.01840894	0.04101511	0.27301701	0.18698299
26	26.049	0.9	0.03695342	0.08233223	0.98635077	0.81364923
32	32.109	2.6	0.04508018	0.10043863	2.70534092	2.49465908
39	39.149	2.6	0.04148628	0.09243142	2.69694289	2.50305711

*t_{ST}=2.228, para n=10

Tabla 7 Exactitud (nivel)

.

El fenómeno de descompensación que se presenta cuando se hace una comparación de una misma medida tanto como nivel descendente como ascendente, que debería ser el mismo. La histéresis, (50) se puede expresar en porcentaje

$$histéresis = \left|\frac{Vasc - Vdesc}{100 - 0}\right| 100\% \quad (50)$$

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

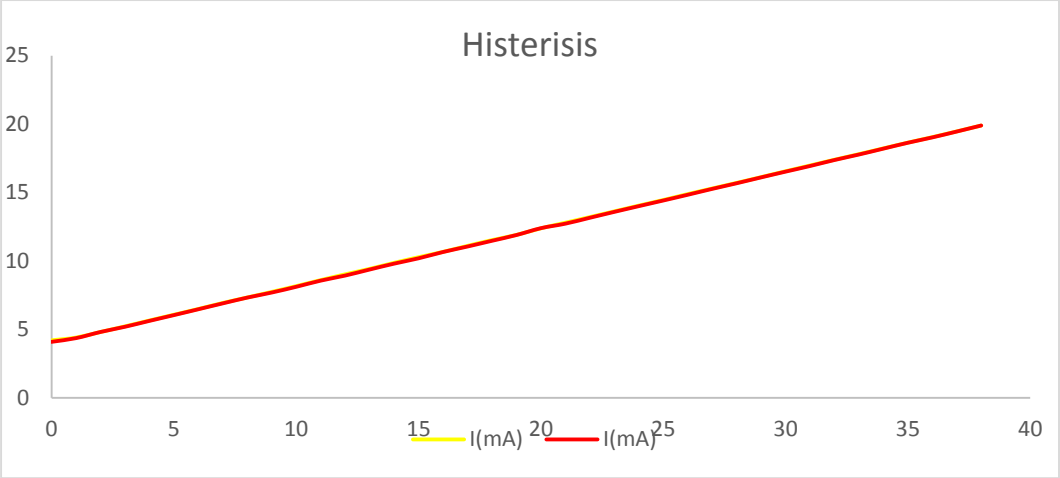


Fig. 32 Histéresis

H(cm)	I(mA) llenado	I(mA) vaciado	Histéresis
0	4.21	4.1	0.11
1	4.41	4.37	0.04
2	4.82	4.82	0
3	5.23	5.2	0.03
4	5.66	5.63	0.03
5	6.08	6.05	0.03
6	6.5	6.48	0.02
7	6.94	6.91	0.03
8	7.34	7.33	0.01
9	7.75	7.7	0.05
10	8.17	8.12	0.05
11	8.61	8.57	0.04
12	9.03	8.94	0.09
13	9.43	9.38	0.05
14	9.87	9.81	0.06
15	10.28	10.2	0.08
16	10.67	10.66	0.01
17	11.11	11.06	0.05
18	11.53	11.48	0.05
19	11.91	11.9	0.01
20	12.39	12.4	-0.01
21	12.8	12.73	0.07
22	13.21	13.16	0.05
23	13.63	13.59	0.04
24	14.05	14.01	0.04
25	14.46	14.42	0.04

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

26	14.89	14.84	0.05
27	15.3	15.27	0.03
28	15.71	15.68	0.03
29	16.13	16.11	0.02
30	16.56	16.53	0.03
31	16.98	16.94	0.04
32	17.4	17.38	0.02
33	17.81	17.78	0.03
34	18.23	18.21	0.02
35	18.65	18.64	0.01
36	19.05	19.03	0.02
37	19.47	19.46	0.01

Tabla 8 Histéresis (Nivel)

Linealización sensor de Temperatura.

Se realizó calibración y ajuste con un patrón de comparación, ver Anexo 2. Luego de tener listo el sensor de temperatura, llenamos al tanque a un volumen de 22 litros y se procede a encender la resistencia y tomar los datos de temperatura vs datos del sensor de temperatura entregados por RSLogix, anexo 2 “Tabla A2.1” Sensor Temperatura (°C vs RSLogix), se realizó la regresión lineal de los datos mencionados anteriormente como se observa en la Figura 33.

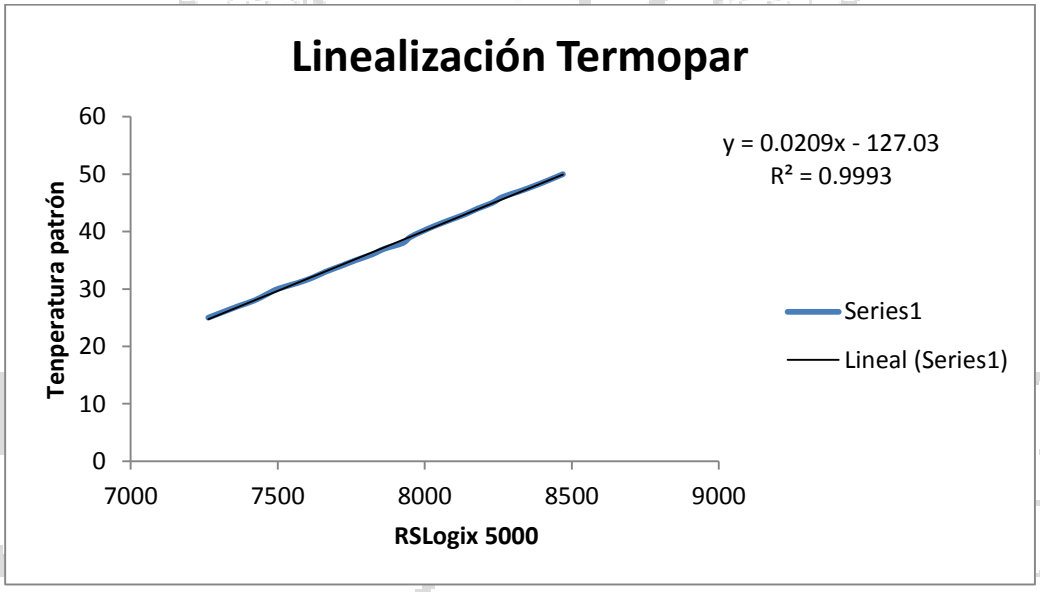


Fig. 33 Linealización sensor de Temperatura

N°	Valor medido C°					
	25	30	35	40	45	50
1	25.16	30.05	35.01	40.01	44.98	50.1
2	25.17	30.02	35.01	40.02	44.97	50.19
3	25.18	30.04	35.02	40.01	44.97	50.21
4	25.15	30.02	35.06	39.98	44.98	50.15
5	25.16	30.01	35.04	39.99	44.99	50.18
6	25.16	30.03	35.02	39.97	45.02	50.17
7	25.15	30.02	35.04	39.98	44.97	50.19
8	25.18	30.06	35.03	39.97	44.97	50.14
9	25.17	30.05	35.03	40.01	44.98	50.16
10	25.18	30.02	35.03	40.01	45.03	50.15

Tabla 9 Valor medido Temperatura

C°	FB
25	0.97560976
30	0.9979044
35	0.99770528
40	0.99108028
45	0.97465887
50	0.97465887

Tabla 10 Factor Correlación Temperatura.

C°	x	B	S	Sp	Acc+	Acc-
25	25.1660	2.5	0.01173788	0.02615199	2.52742844	2.47257156
30	30.032	0.21	0.01686548	0.03757629	0.24941035	0.17058965
35	35.029	0.23	0.01523884	0.03395213	0.2656093	0.1943907
40	39.995	0.9	0.01900292	0.04233851	0.94440501	0.85559499
45	44.986	2.6	0.02170509	0.04835895	2.65071929	2.54928071
50	50.164	2.6	0.03134042	0.06982647	2.67323462	2.52676538

Tabla 11 Exactitud Temperatura

Calculo Resistencia Calefactora

Para elegir la resistencia adecuada para que caliente cierta cantidad de agua, se decidió calentar 22 litros de agua, que permitan realizar la mezcla en el tanque de su mismo nombre, despejamos de (23).

$$m = \rho v$$

- $\rho\ agua = 1\frac{gr}{cm^3}$
- $1\ Litro\ (L) = 1000\ cm^3 \quad \rightarrow 22L = 22000\ cm^3\ \ entonces$:

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

$$m = \left(\frac{1gr}{cm^3}\right) * (22000\ cm^3) = 22000\ gr$$

De (22)

- $1\ caloría\ (cal)\ =\ 4186\ Joule.$
- $Calor\ especifico\ del\ agua\ = \frac{1cal}{gr*°C}$
- $\Delta T = La\ temperatura\ entre\ 19°C\ y\ 50°C$, donde se procederá a elevar la temperatura del agua.

$$\Delta Q = 22000\left(\frac{1cal}{gr * °C}\right)(50°C - 19°C) =\ 682000\ Calorías$$

$$Energía = 682000\left(\frac{4.186J}{1cal}\right) =\ \ 2854852\ J$$

Si $Potencia = \frac{Energia}{tiempo}\ \ entonces$:

Si nuestro tiempo de calentamiento es de 25 minutos podemos obtener la potencia de la resistencia que necesitamos. En (51) se muestra la potencia de la resistencia calefactora.

$$Potencia = \frac{2854852\ J}{1500\ s}\ = 1903.2346w \tag{51}$$

Podemos observar que la resistencia debe ser más o menos de 2000 w.

4.1.6 Configuración y Adecuación de Equipos de Trabajo.

Configuración PLC

Para la configuración por primera vez, asignación de la IP al PLC de la serie 1769_L23E_QB1B de Allen-Bradley, se siguieron los pasos proporcionados por Rockwell automatización que se encuentra en el manual del equipo [13], la IP que se le asignó al PLC fue **130.130.130.81**, a continuación se mostrara los pasos para agregar el PLC a la plataforma de desarrollo Rslogix5000 versión 19.0 y partiendo de los pasos seguidos anteriormente, para dejar plataforma lista para desarrollar el proyecto.

1. Se ingresa a Rslogix 5000 inicio/todos los programas/Rockwell Software/Rslogix 5000 Enterprise Series/ Rslogix 5000.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

2. Creación de nuevo Proyecto. Ver Figura (34). File/ New/ Se selecciona el controlador/ se asigna el Nombre al proyecto/ se selecciona dónde se quiere que guarde el archivo/ ok.

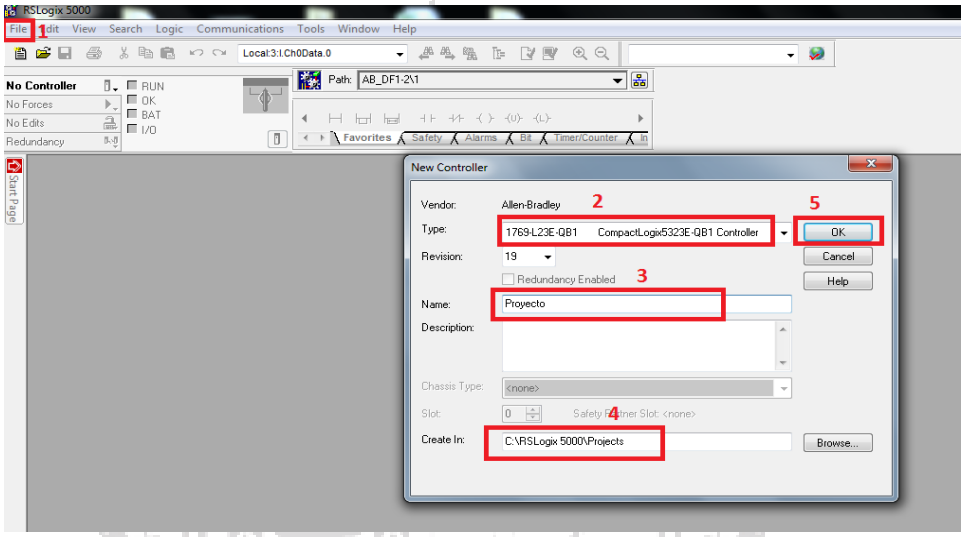


Fig. 34 Creación de un nuevo Proyecto

3. Se abre Rslinx Clasic inicio/todos los programas/Rockwell Software/Rslinx/ Rslinx Clasic.

4. Configuración driver. Ver Figura (35). Comunication/ Configure Drivers/ Selecciona Ethernet Devices/ Add New/ al agregar el driver aparece una ventana de verificación dando clic en ok. Ver Figura (36).

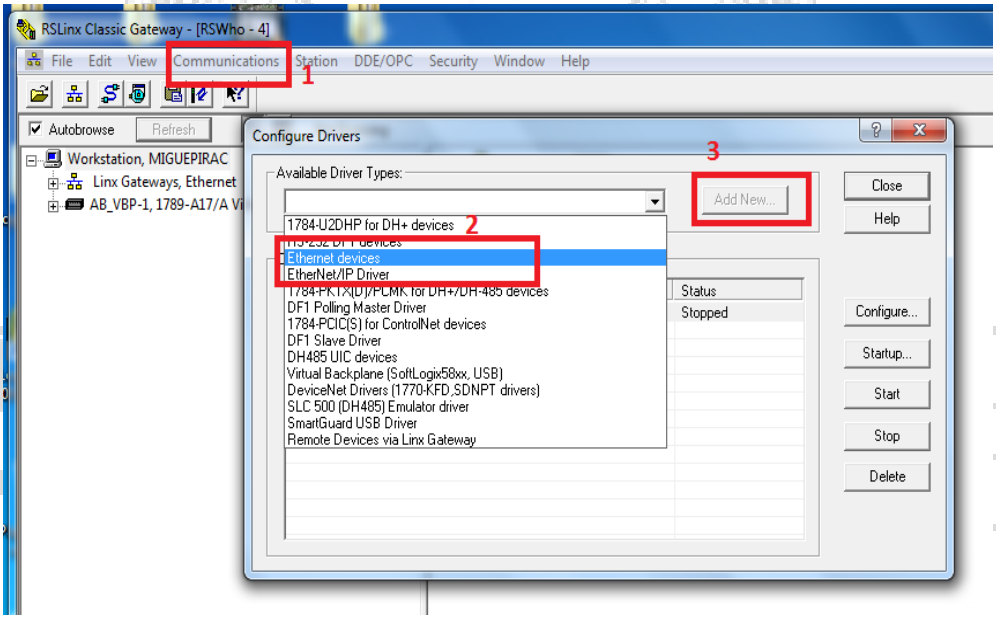


Fig. 35 Configuración Driver

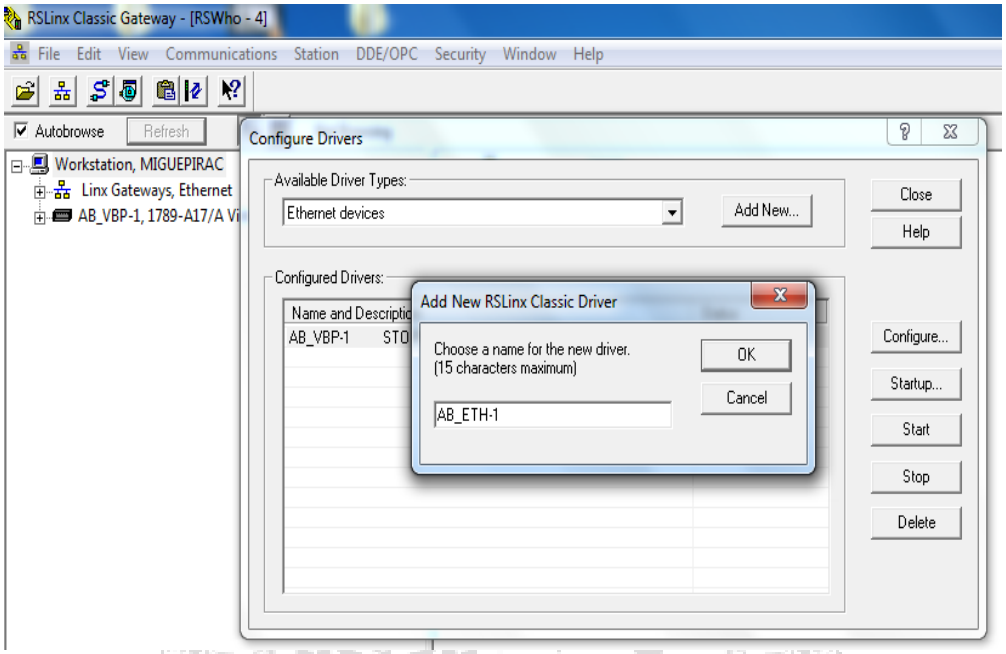


Fig. 36 Confirmación Driver.

5. Cuando se tiene agregado el driver y en modo “running”, se da clic en “configure” y se asigna la IP correspondiente. Ver Figura (37).

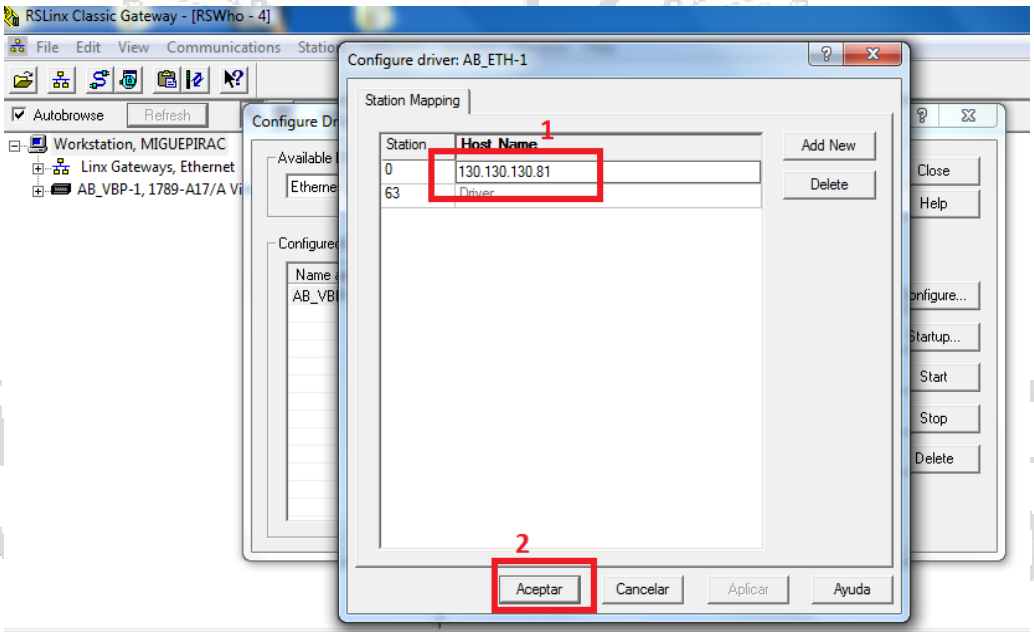


Fig. 37 Asignación de IP.

6. Luego de asignar la IP, se verifica que efectivamente el controlador haya sido agregado al proyecto. Ver Figura (38). Ya se puede dar inicio al primer código.

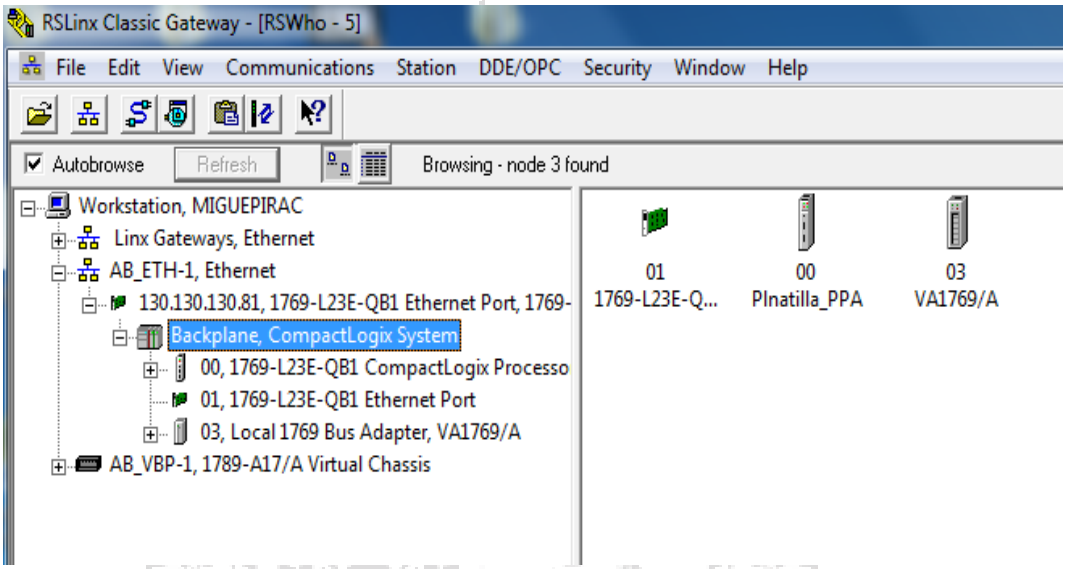


Fig. 38 Verificación Controlador

- Agregar módulo de entradas análogas

7. Con el proyecto creado en el paso 2. Se busca la carpeta I/O Configuration/ CompactBus Local/click derecho/ New Module. Ver Figura 39.

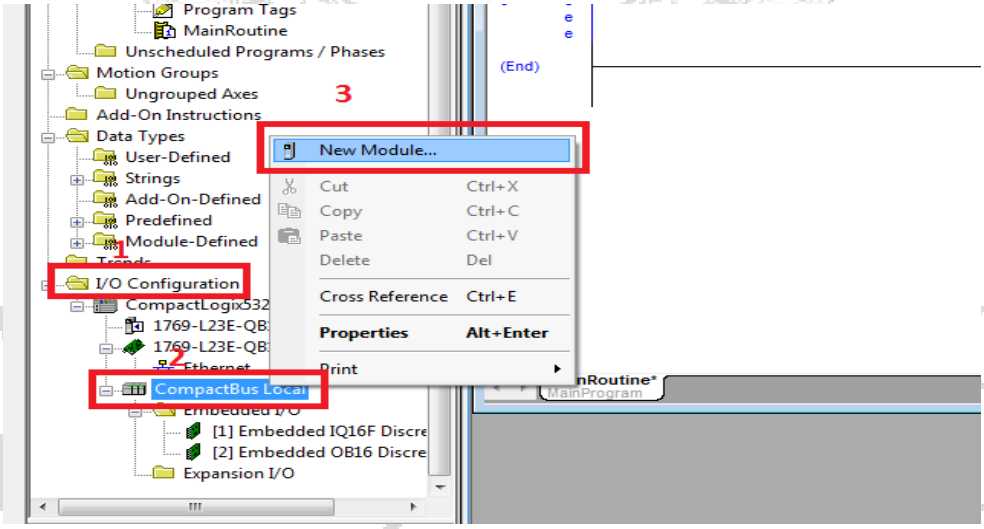


Fig. 39 Buscar Modulo Entradas Análogas.

8. Se busca el módulo de entradas análogas 1769-IF4. /Analog/ 1769-IF4/ Ok. Ver Figura 40.

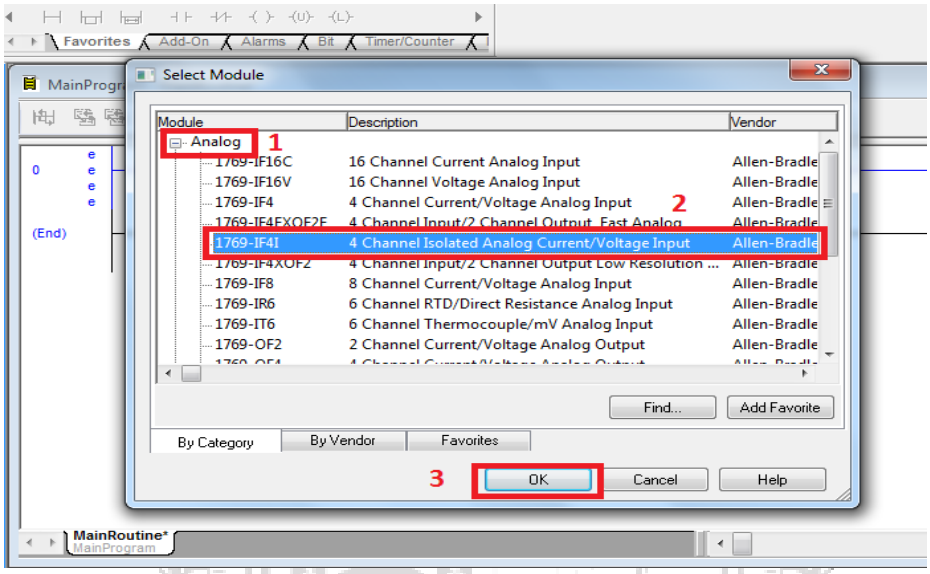


Fig. 40 Buscar Modulo Entradas Análogas.

9. Para la configuración del módulo se asigna un nombre ver Figura 41, en "Configuration" se efectúa la configuración según Tabla 2. Para este caso el canal 0 y 1 de 4-20mA para el transmisor de Nivel y de temperatura ver Figura 42.

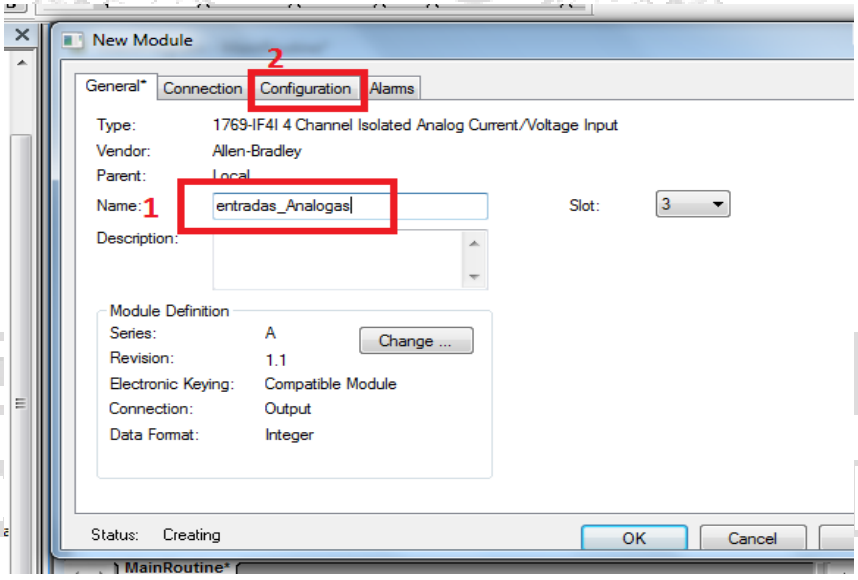


Fig. 41 Asignación de nombre al módulo de entradas análogas.

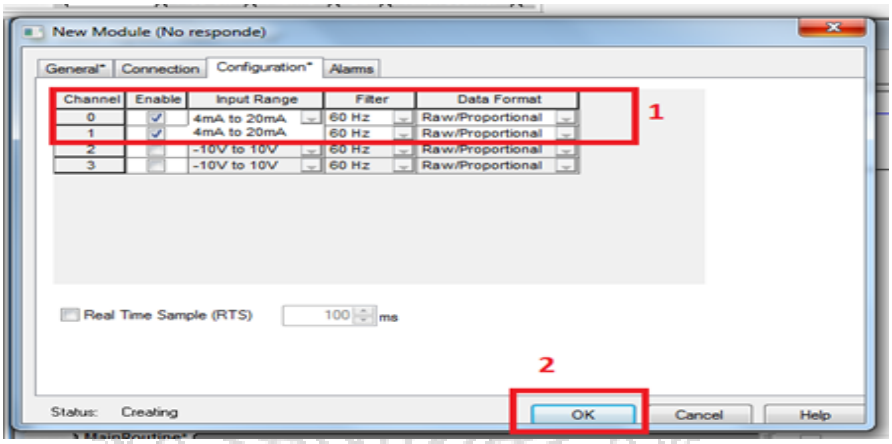


Fig. 42 Configuración de Canales.

Configuración HMI

Para la configuración por primera vez, asignación de la IP a nuestro Pantalla HMI panel View plus 600 de Allen-Bradley, se siguieron los pasos proporcionados por Rockwell automatización que se encuentra en el manual [16], la IP que se le asignó a la HMI fue **130.130.130.70**, la asignación es igual a la anterior desarrollada para el PLC, lo único que cambia es la IP. Cuando se deja configurado el driver se procede a realizar los siguientes pasos para la creación del proyecto.

1. Se abre Factory Talk View Studio inicio/todos los programas/Rockwell Software/ Factory Talk View / Factory Talk View Studio.

2. Al abrir el programa automáticamente aparece la siguiente ventana ver Figura 43. y se selecciona /Machine Edition/ Continue.

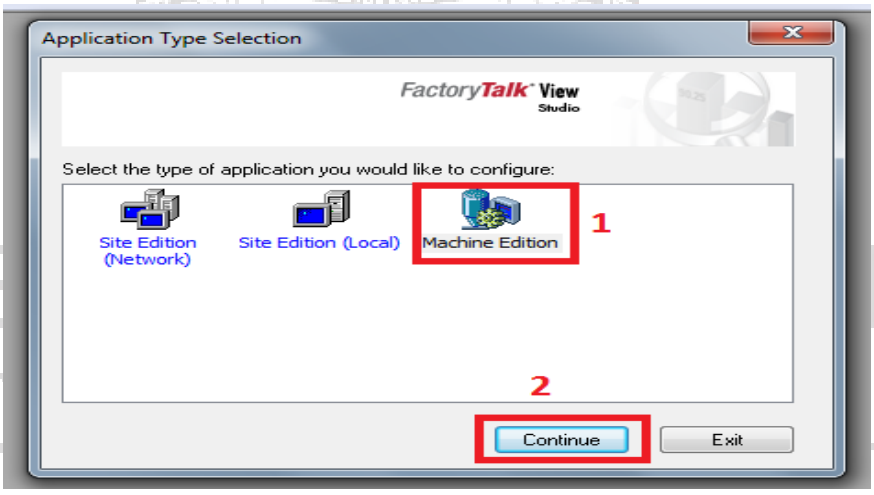


Fig. 43 Creación Nuevo Proyecto Factory Talk View

3. Se crea el nuevo proyecto /New / se asigna el nombre al proyecto / créate. Ver Figura 44.

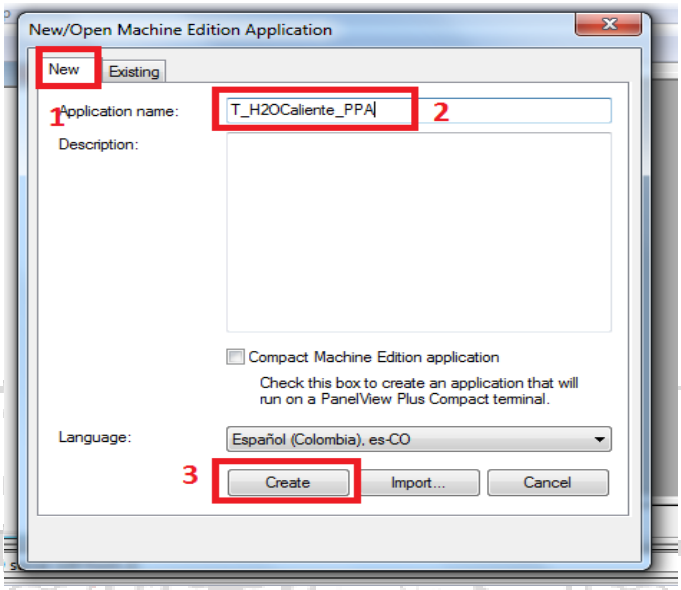


Fig. 44 Creación Nuevo Proyecto

4. Se agrega el proyecto a al controlador compac logix 5000 /Comunication Setup /Click derecho Open/ se busca el controlador /Add /Copiar diseño a la rutina/Verify /Ok. Ver Figura 45.

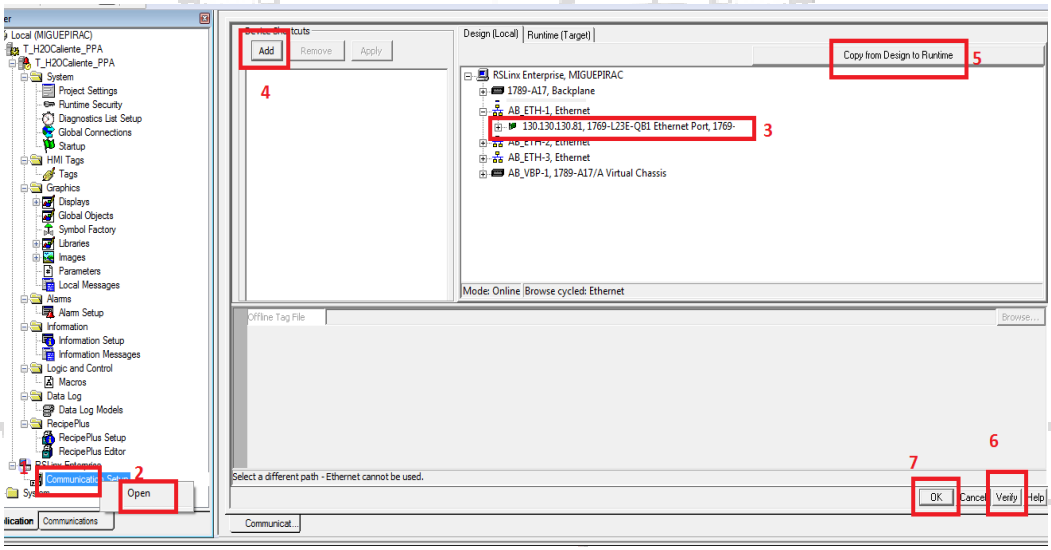


Fig. 45 Comunicación con Controlador Compact Logix

5. Configuración de la Panel View plus 600 / Project settings / Clic derecho Open / se selecciona el panel view /Ok. Ver Figura 46.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

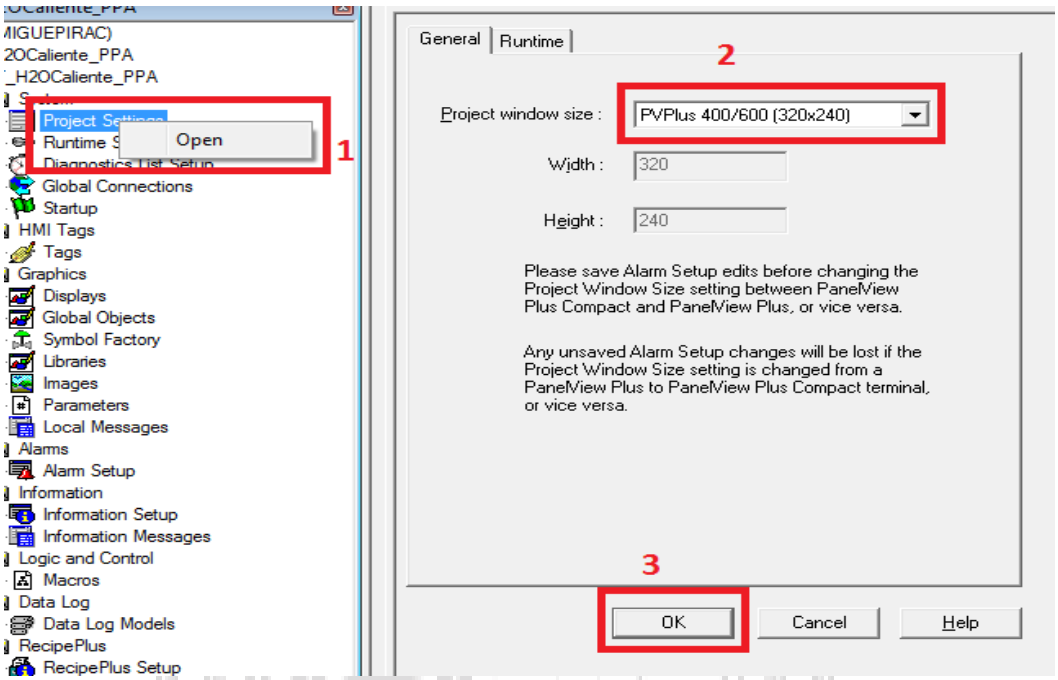


Fig. 46 Selección panel View

Quedando lista la conexión para poder iniciar la primera visualización.

Configuración Variador (PowerFlex 40).

Para la configuración por primera vez, asignación de la IP al Variador PowerFlex 40 de Allen-Bradley, se siguieron los pasos proporcionados por Rockwell automatización que se encuentra en el manual [17], la IP que se le asignó al PLC fue **130.130.130.90**, en el anexo 3 y 4 se muestran el paso a paso de la configuración realizada.

4.1.7 Identificación del Sistema y Representación

Para la identificación del tanque y el sistema en general se realizó de manera experimental, por métodos Paramétricos.

Toma de datos del sistema.

El proceso se llevó a cabo de la siguiente manera, inicialmente se llena el tanque hasta la altura máxima ver Tabla 3 (39cm = 0.39m), para posterior mente vaciarlo con la válvula totalmente abierta ver Figura 28, tomando el tiempo de vaciado del tanque. Para obtener los datos se desarrolló un programa en el Software Rslogix 5000 y graficando en el Trend tomando muestras cada 500 ms. Ver Figura 47, se exportaron los datos en formato .CVS para poderlos manipular.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

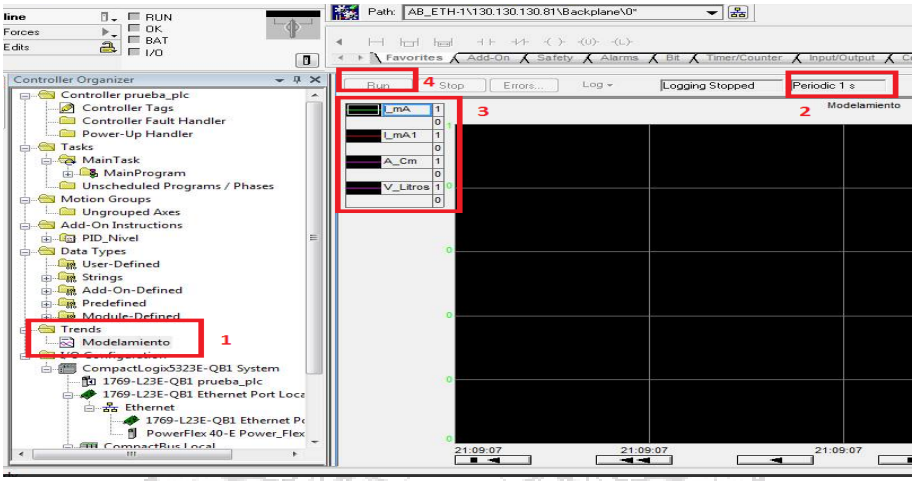
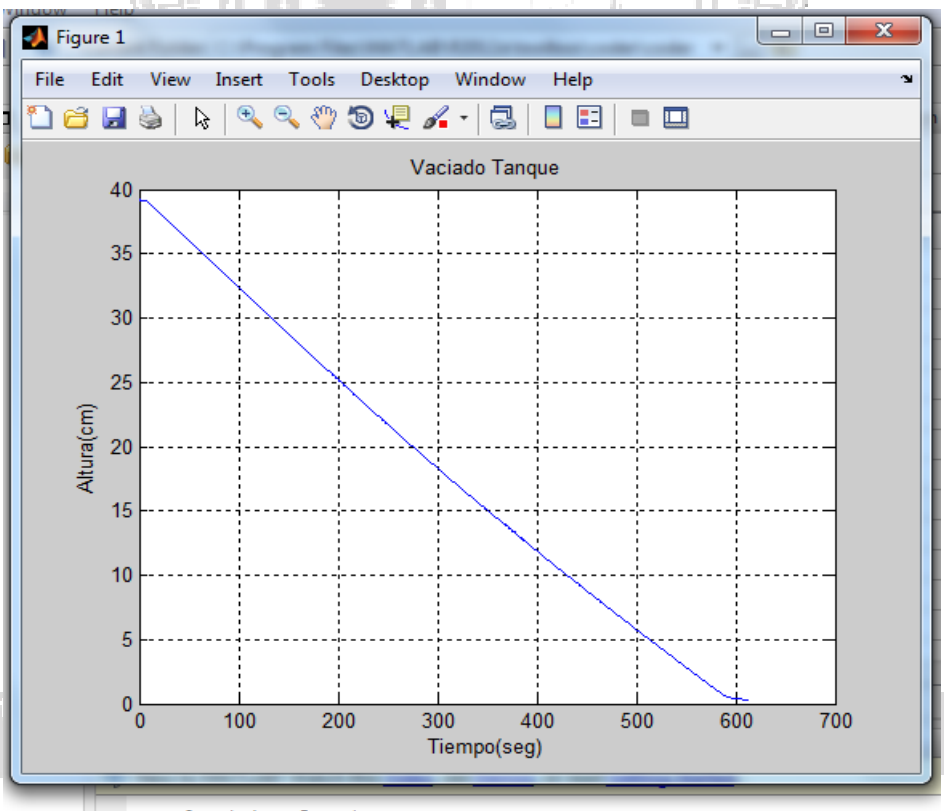


Fig. 47 Datos Trend

Importando los datos obtenidos anteriormente a Matlab, Ver Anexo 5 graficando los datos reales. Ver Figura 48 Vaciado tanque real se obtienen las siguientes gráficas.




```
>> plot(time,A_cm)
>> grid on
xlabel('Tiempo(seg)')
ylabel('Altura(cm)')
title('Vaciado Tanque')
```

Fig. 48 Vaciado de tanque real

Simulación Dinámica del Tanque

Teniendo la ecuación (12), que representa el análisis dinámico del tanque no lineal, mediante la herramienta Simulink de Matlab, se realiza el diseño de manera que se pueda corroborar la K (ganancia) que se ajuste a los datos reales de la Figura 48. La Figura 49, muestra el diagrama de bloques de nuestro del tanque en Simulink.

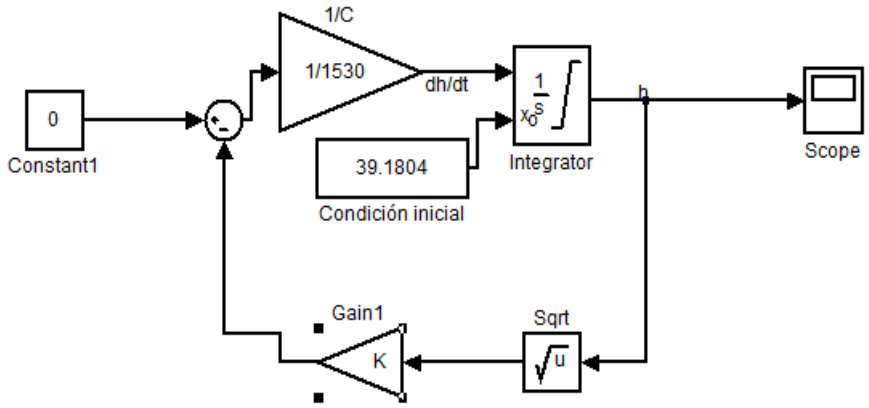


Fig. 49 Diagrama de Bloques Tanque Simulink.

Con el fin de encontrar el valor de ganancia K de la ecuación (12), se comparan los valores experimentales de vaciado de tanque, figura 48 vs la simulación del vaciado del tanque mediante la herramienta Simulink, figura 49.

Se observa que el tiempo de los datos obtenidos del Trend Rslogix 5000, tiempo de vaciado fue de 614 segundos, este mismo tiempo se lleva a Simulink. Se configura el Scope, y en history se asigna un nombre 'vaciadoSimulado' para poder exportar a workspace y poder superponer las gráficas, para observar la similitud. Ver Figura 50. Configuración tanque Simulado.

Se eligió un valor arbitrario para K en Simulink, comparando los datos simulados con los reales, después de varios iteraciones de los valores ingresados para K, se determinó un valor de K=21 obteniendo en este valor lo más parecido posible a los reales. Ver Figura 51. Vaciado del tanque Simulado.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

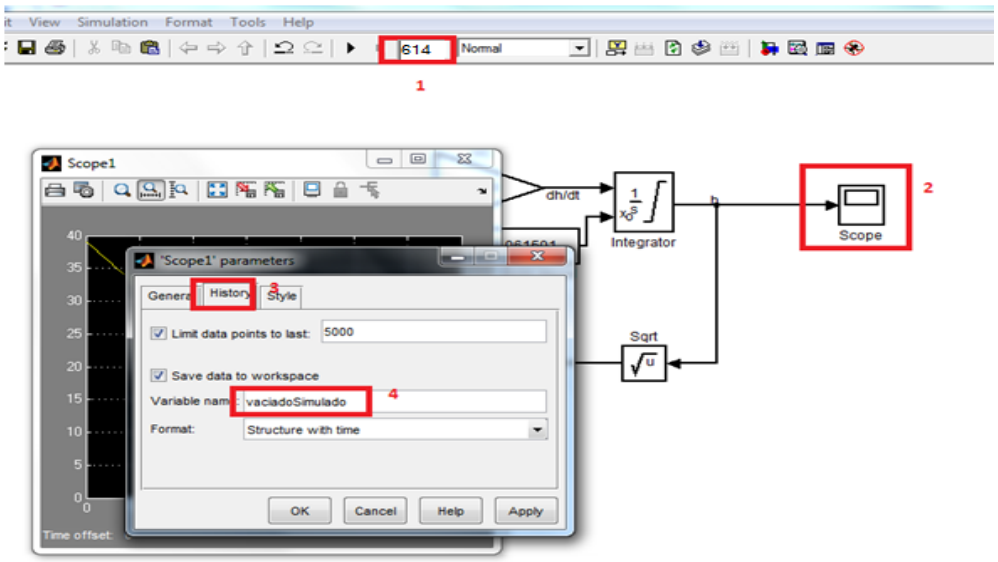


Fig. 50 Configuración tanque Simulado

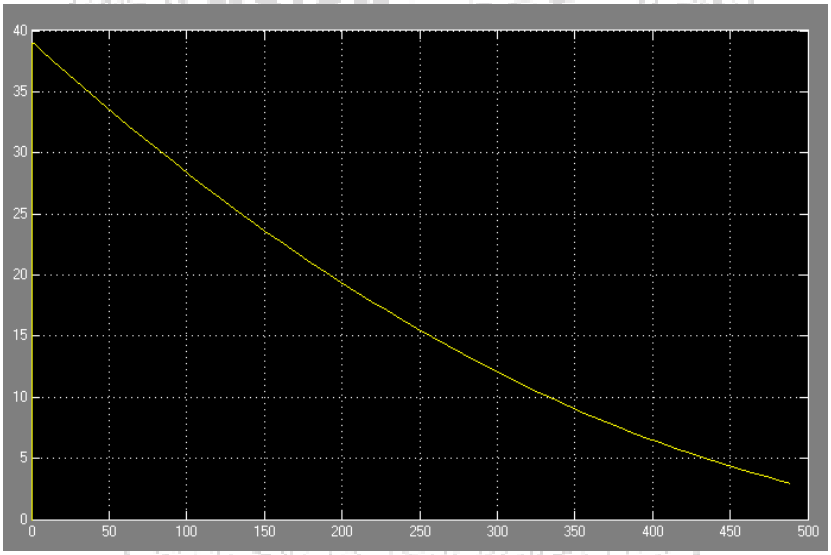


Fig. 51 Vaciado tanque Simulado

En la Figura 52. Figura Superpuestas, se observa la proximidad del comportamiento del vaciado del tanque simulado (Azul) con los valores experimentales reales (Amarillo).

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

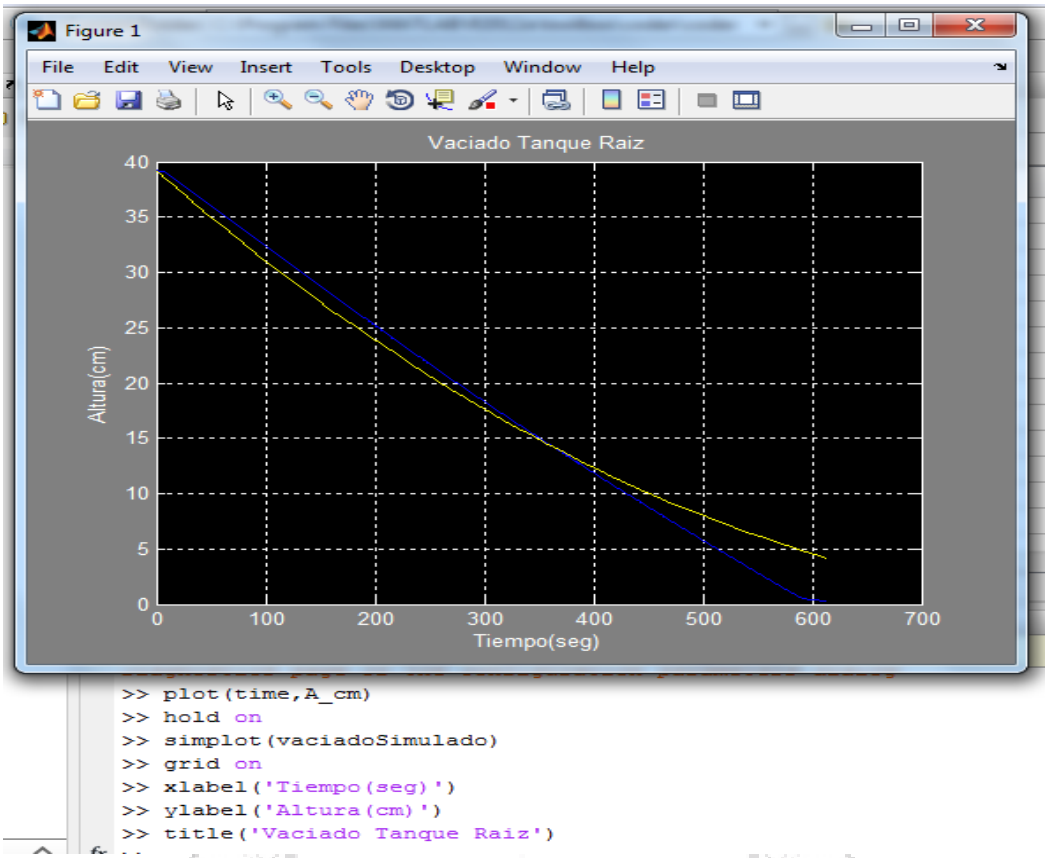


Fig. 52 Señales Superpuestas.

Pruebas y correcciones. Al sobreponer las gráficas como se observa en la Figura 52, la ganancia K=21 es la más cercana posible al modelo real, pero el error sigue siendo demasiado grande, por lo que se optó por utilizar otro método para minimizar el error, como el tanque cuenta con indicador de nivel por litros, Figura 29, se tomó el volumen del vaciado del tanque y paso a cm^3/s para poder calcular el caudal de salida de manera experimental. Se realizó regresión a los datos obteniendo los siguientes resultados. Ver Figura 53 Caudal de salida experimental.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

A_Cm	cm3/s
35.773087	121.6645
35.59819	117.2546
35.559837	123.7404
35.407951	125.0373
35.338913	123.4802
35.286751	124.2585
35.121059	121.6644
35.053558	121.6659
35.004463	126.5938
34.904743	123.2216
34.828033	119.3306
34.766663	123.2216
34.66848	115.9584
34.608646	121.4066
34.551884	124.7787
34.487446	124.2599
34.401531	119.3306
34.334023	120.8863
34.255783	123.7411
34.176006	119.3299

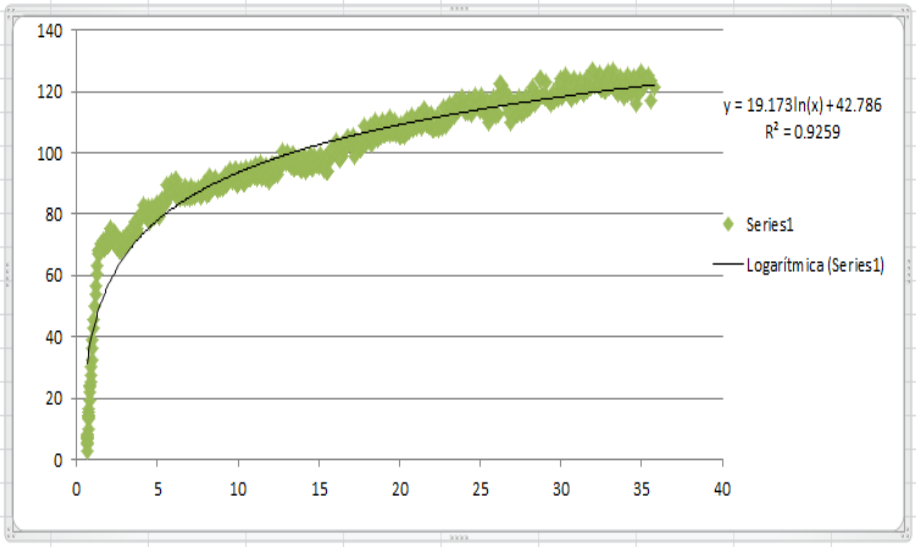


Fig. 53 Caudal de salida experimental.

Realizando regresión logarítmica a los datos obtenidos, se tiene una aproximación del 0.9259% y es llevada a Simulink como se observa en la Figura 54. Tanque por Ecuación. Obteniendo una aproximación de un mínimo error al modelo del tanque real, ver Figura 55. Graficas Superpuestas ecuación.

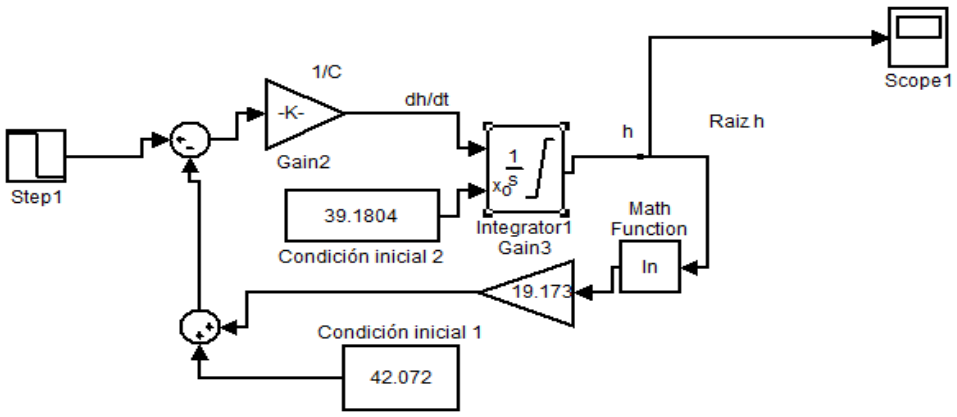
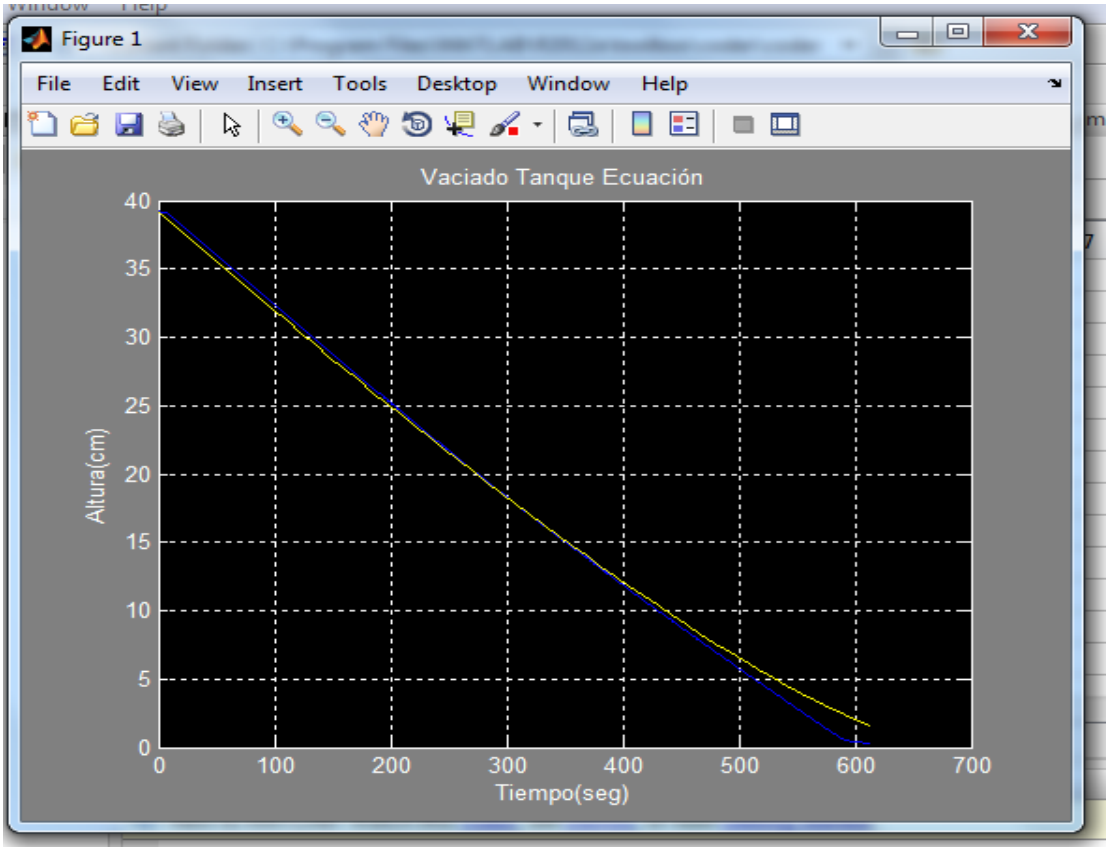


Fig. 54 Tanque por Ecuación




```
>> plot(time,A_cm)
>> hold on
>> simplot(VaciadoSimulado2)
>> grid on
>> xlabel('Tiempo(seg)')
>> ylabel('Altura(cm)')
>> title('Vaciado Tanque Ecuación')
```

Fig. 55 Graficas Superpuestas ecuación

Mediante este método se observa que se reduce el error en comparación al modelo de K=21, pero se observa que en la parte final tiene a incrementar el error, debido a que los datos nos son muy exactos, pero se parece al modelo real por lo cual se determinó dejarlo así, teniendo en cuenta que si la planta contara con un medidor de flujo el error seria aún más mínimo.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Simulación Dinámica del Actuador (Bomba)

Para representar la bomba se hizo uso de la función Lookup Table de Simulink, la cual permite obtener la curva característica del proceso sin necesidad de conocer los valores que representan las entradas y salidas para cada instante en el proceso. Ver Figura 56. Función Lookup Table

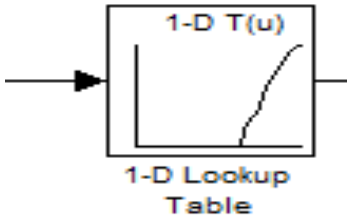


Fig. 56 Función Lookup Table

Mediante los datos obtenidos también se observó un retardo trascurrido desde el momento que se inyecta energía a la bomba mediante el variador hasta el momento que hay inyección de agua al tanque. Para trabajar el modelo con las mismas unidades se realiza la respectiva conversión de litros/min a cm^3/s. Ver Figura 57 Modelo Bomba Simulink.

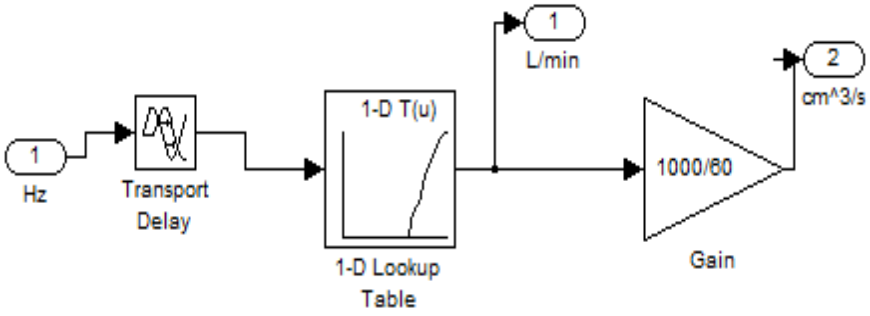


Fig. 57 Modelo Bomba Simulink

Simulación Dinámica del Sensor Nivel

Para la realización del modelo del sensor, se tomó la ecuación de linealidad de los datos de corriente vs altura. Ver Figura 30 Linealización Sensor de Nivel para Altura, y se implementó en Simulink teniendo en cuenta que el sensor presenta un modelo estático. Ver Figura 58. Modelo sensor Nivel Simulink.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

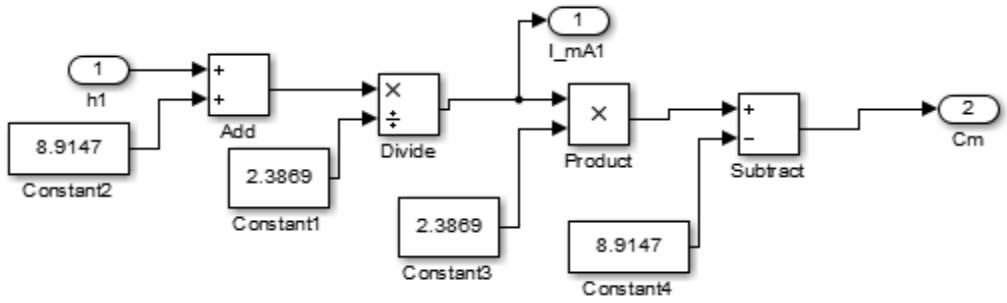


Fig. 58 Modelo Sensor Nivel Simulink

Modelo General Sistema Nivel

Para verificar que el modelo dinámico general del sistema sea similar con el modelo real de nuestra planta para el tanque de agua caliente de la PPA, se estimuló nuestro sistema real a las siguientes frecuencias (42Hz, 44Hz, 46Hz, 48Hz, 50Hz, 52Hz, 54Hz, 56Hz, 58HZ y 60Hz), teniendo en cuenta que nuestro rango de trabajo está comprendido entre los 40-60Hz, con la válvula de control Ver Figura 28, totalmente abierta y esperando que nuestro tanque se llene a su máxima capacidad o encontrando puntos de estabilización.

Los datos obtenidos del trend de rslogix 5000, para cada una de las frecuencias ya mencionadas fueron exportadas en formato .cvs e importados a matlab para su manipulación, de cada una de las frecuencias, se tomó el tiempo máximo en llenado del tanque o punto de estabilización, llevado a Simulink y estimulado con una señal paso simulando cada una de las frecuencias, ver Figura 59. Modelo General Sistema, los resultados obtenidos se encuentran en el anexo 6.

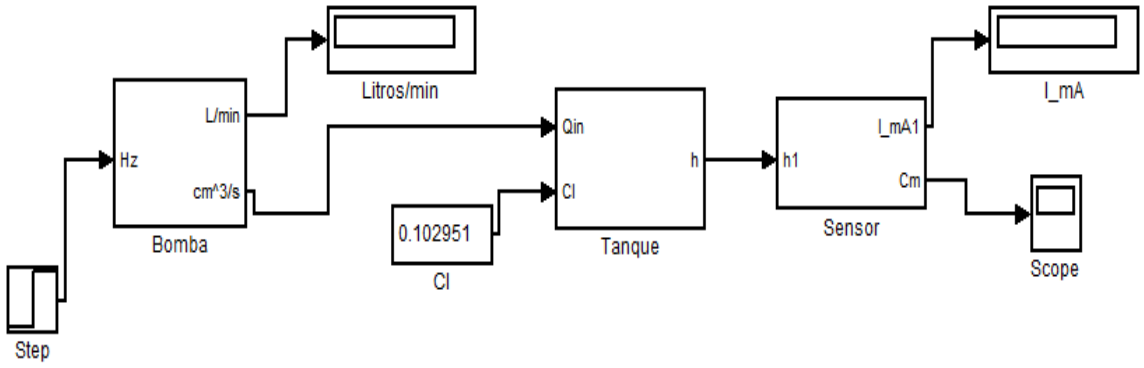


Fig. 59 Modelo General Sistema.

Simulación Dinámica Temperatura

Las condiciones de equilibrio para sistemas térmicos establecen que el calor administrado a un sistema es igual al calor almacenado más el calor liberado (52).

{Energía de entrada} = {Razón de la energía almacenada} + {Energía de salida}

(52)

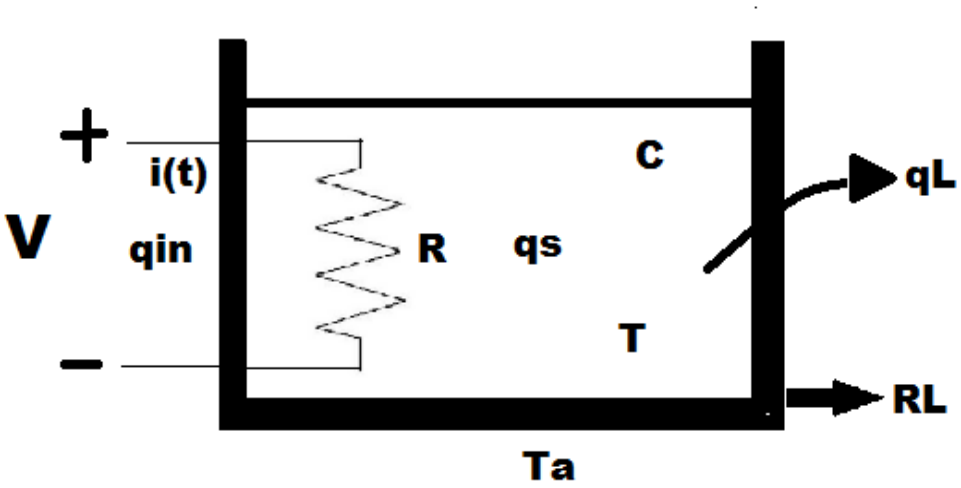


Fig. 60 Análisis Térmico.

- $C = Capacitancia\ Térmica\ Fluido\ (Capacidad\ Calorífica)$
- $RL = Resistencia\ Térmica\ material\ (Pared\ Tanque)$
- $qin = Energía\ Resistencia\ Calentadora$
- $qs = Energía\ Almacenada\ Fluido$
- $qL = energía\ perdida\ al\ medio\ Ambiente$
- $T = Temperatura$
- $Ta = Temperatura\ Ambiente$
- $R = Resistencia\ Térmica$
- $i(t) = Corriente$
- $V = Voltaje$

$$qin = qs + qL$$

Donde

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

- $qin = R * i^2(t)$
- $qs = C\frac{dT}{dt}$
- $qL = \frac{T-Ta}{RL}$

$$R * i^2(t) = C\frac{dT}{dt} + \frac{T-Ta}{RL} \quad \rightarrow \quad R * i^2(t) - \left(\frac{T-Ta}{RL}\right) = C\frac{dT}{dt}$$

$$\left(R * i^2(t) - \left(\frac{T-Ta}{RL}\right)\right)\frac{1}{C} = \frac{dT}{dt} \tag{53}$$

Teniendo la ecuación diferencial (53), que modela nuestro sistema térmico es llevada a Simulink, los datos restantes fueron obtenidos experimentalmente y teóricamente para realizar dicha simulación. Ver figura 61.

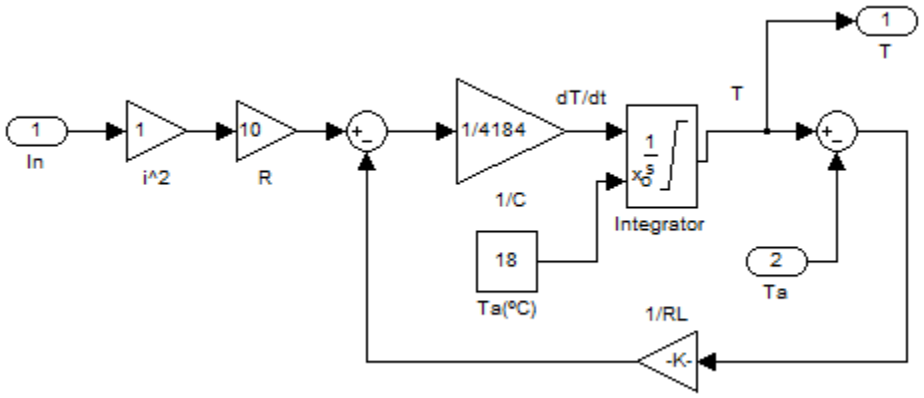


Fig. 61 Modelo Térmico.

Para verificar que el modelo general térmico sea similar con el modelo real de nuestra planta para el tanque de agua caliente de la PPA, se estimuló nuestro sistema real, activando la resistencia térmica para calentar 22 litros de agua con una temperatura ambiente de 20ºC y hasta una temperatura final de 60ºC, estos

datos fueron exportados .cvs desde el trend de rslogix 500 y comparados con el modelo Ver Figura 62, y ajustando con los parámetros iniciales tiempo, temperatura ambiente de los datos reales.

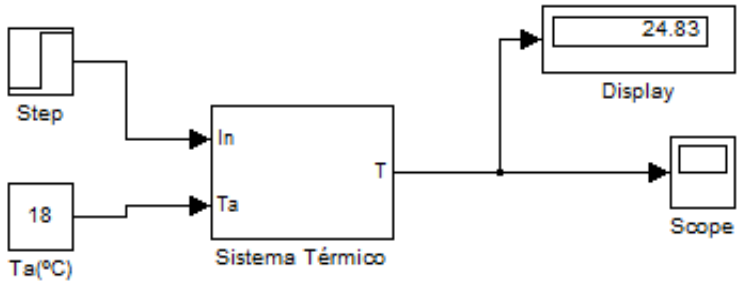


Fig. 62 Modelo General Térmico

4.1.8 Estimulación al sistema mediante la señal cuadrada y pseudo para controlador PID.

La manera en la que se realiza la identificacion del sisterma, es estimulando en uno de los puntos de estabilizacion encontrados (Anexo, Figura A6.8), mediante una señal cuadrada y pseudo desarroladas en Rslogix 500. Figura 63 Señal Cuadrada, Seudo.

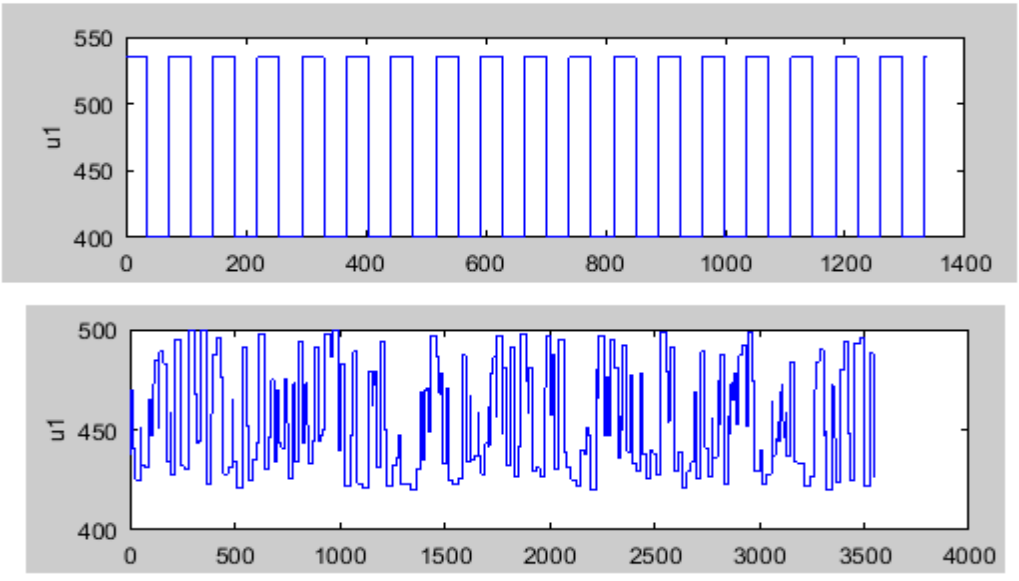


Fig. 63 Señal Cuadrada, Seudo

Una vez obtenidos los datos se exportan de manera igual a como se hizo para el proceso de vaciado del tanque (anexo 5).

La realizacion de la identificacion mediante el toolbox de matlab “Ident” escogiendo varios modelos hasta encontrar el modelo que represente el mayor porcentaje de similutud.

Se elige el porcentaje más óptimo posible entre los modelos, como se observa la aproximación que se eligió es de tipo ARMAX4441 de 87,7%, En el anexo 7 Paso a paso procedimiento de identificacion y realizacion del controlador PID. la Figura 64 Estimación Ident Matlab .

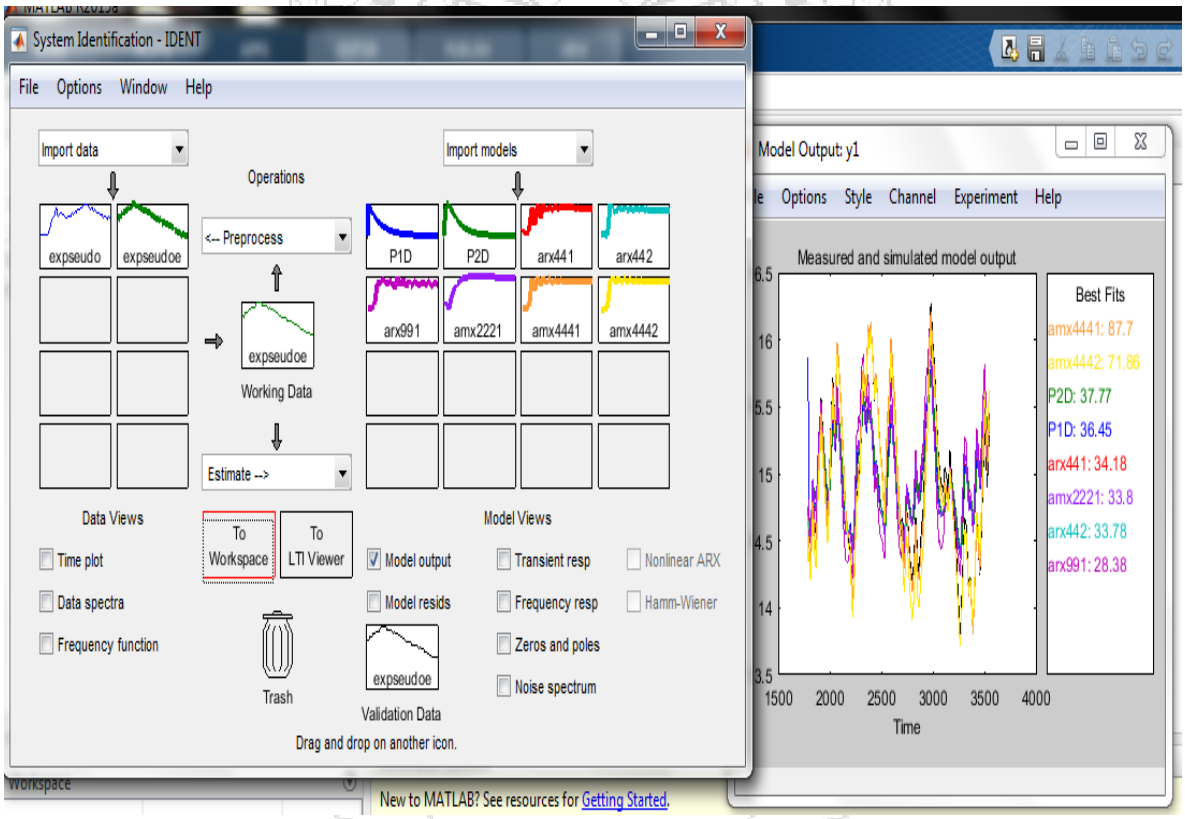


Fig. 64 Estimación Seudo Ident Matlab

Teniendo en cuenta que la ecuación que utiliza matlab es la de forma paralela, utilizamos la ecuación que corresponde a esta forma del PIDE de rslogix [18] ver Figura 65 Ecuación forma paralela PIDE rslogix5000, con el fin de despejar las constantes que correspondan a la configuración de PIDE.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

$$CV_n = CV_{n-1} + K_P\Delta E + \frac{K_I}{60}E\Delta t + 60K_D\frac{E_n - 2E_{n-1} + E_{n-2}}{\Delta t}$$

where:
CV = Control variable
E = Error in percent of span
Δt = Update time in seconds used by the loop
K_P = Proportional gain
K_I = Integral gain in min^{-1}. Note that a larger value of K_I causes a faster integral response.
K_D = Derivative gain in minutes

Fig. 65 Ecuación forma paralela PIDE rslogix5000 [18].

4.1.9 Análisis matemático para determinar las constantes PID

Teniendo en cuenta la ecuación del controlador PID que utiliza Allen Bradley para sus controladores compact logix, y en el cual vamos a introducir las constantes Kp, Ki y Kd. Que permitan concordar con al análisis hecho en matlab. De la siguiente manera:

$$Cv_n = Cv_{n-1} + Kp\Delta t + \frac{Ki}{60}E\Delta t + 60Kd\left(\frac{E_n - 2E_{n-1} + E_{n+2}}{\Delta t}\right)$$

- $\Delta t = Tiempo\ de\ muestro$
- $\Delta E = E_n - E_{n-1}$

$Entonces$

$$Cv_n - Cv_{n-1} = Kp(E_n - E_{n-1}) + \frac{Ki}{60}E\Delta t + 60Kd\left(\frac{E_n - 2E_{n-1} + E_{n+2}}{\Delta t}\right)$$

- $Trasformando\ al\ dominio\ de\ la\ trasformada\ discretizada\ (Z)$

$$Cv(z) - Cv(z) * z^{-1} = Kp(E(z) - E(z) * z^{-1} + \frac{Ki}{60}E(z)\Delta t + 60KdE(z)\left(\frac{1 - 2z^{-1} + z^{-2}}{\Delta t}\right)$$

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

$$Cv(z)(1-z^{-1}) = KpE(z)(1-z^{-1}) + \frac{KiE(z)\Delta t}{60} + 60KdE(z)\left(\frac{(1-z^{-1})^2}{\Delta t}\right)$$

- $dividiendo\ en\ (1-z^{-1})$

$$Cv(z) = KpE(z) + \frac{KiE(z)\Delta t}{60(1-z^{-1})} + 60KdE(z)\left(\frac{(1-z^{-1})}{\Delta t}\right)$$

- $Factorizando\ E(z)$

$$Cv(z) = E(z)\left(Kp + \frac{Ki\Delta t}{60(1-z^{-1})} + 60Kd\left(\frac{(1-z^{-1})}{\Delta t}\right)\right)$$

- $Entonces$

$$\frac{Cv(z)}{E(z)} = Kp + \frac{Ki\Delta t}{60(1-z^{-1})} + 60Kd\left(\frac{(1-z^{-1})}{\Delta t}\right) \quad (54)$$

Multiplicando y dividiendo por (z), obtenemos 55.

$$\left(Kp + \frac{Ki\Delta t}{60(1-z^{-1})} + 60Kd\left(\frac{(1-z^{-1})}{\Delta t}\right)\right) * \frac{z}{z}$$

$$\boldsymbol{Kp + \frac{z\,Ki\Delta t}{60(z-1)} + 60Kd\left(\frac{(z-1)}{z\,\Delta t}\right)} \quad (55)$$

En 55, tenemos la ecuación PID de forma paralela que utiliza Allen Bradley, en tiempo discreto, también observamos que tiene 2 ceros y 2 polos.

- Luego de exportar el controlador al workspace (Anexo 7, Figura A7.22) analizando con sisotool, se obtiene lo siguiente función de transferencia. Ver Figura 66 Función de Transferencia "C" Cuadrada.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

```
>> tf(C)

ans =

  37.53 z^2 - 30.32 z + 0.2384
  ----------------------------
            z^2 - z

Sample time: 0.5 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Fig. 66 Función de Transferencia C

Si igualamos la función de transferencia ver Figura 66 a 55, podemos despejar las constantes del PID.

$$\frac{37.53z^2 - 30.32z + 0.2384}{z^2 - z} = Kp + \frac{z\,Ki\Delta t}{60(z-1)} + 60Kd\left(\frac{(z-1)}{z\,\Delta t}\right),$$

$$si\ z^2 - z = z(z-1)$$

$$503z^2 - 496z + 2.958 = Kp(z^2 - z) + \frac{z\,z(z-1)Ki\Delta t}{60(z-1)} + 60Kd\left(\frac{(z-1)z(z-1)}{z\,\Delta t}\right)$$

$$\rightarrow\ Kpz^2 - Kpz + \frac{Ki\Delta t\,z^2}{60} + 60Kd\left(\frac{(z-1)^2}{\Delta t}\right),\qquad si\ (z-1)^2 = (z^2 - 2z + 1)$$

$$\rightarrow\ Kpz^2 - Kpz + \frac{Ki\Delta t\,z^2}{60} + \frac{60Kdz^2}{\Delta t} - \frac{120Kdz}{\Delta t} + \frac{60Kd}{\Delta t}$$

(56)

1. $$Kpz^2 + \frac{Ki\Delta t\,z^2}{60} + \frac{60Kdz^2}{\Delta t} = 37.53z^2$$

(57)

2. $$-Kpz - \frac{120Kdz}{\Delta t} = -30.32z$$

(58)

$$\frac{60Kd}{\Delta t} = 0.2384\ \rightarrow\ Kd = \frac{0.2384(0.5)}{60}\ \rightarrow\ \boldsymbol{Kd = 1.9866^{-3}}$$

Despejando **Kd** en 58 obtenemos

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

$$-Kp - \frac{120(1.9866^{-3})}{0.5} = -30.32 \rightarrow -Kp = -30.32 + 0.476 \rightarrow \boldsymbol{Kp = 29.84}$$

Despejando **Kp** en 57obtenemos

$$29.84 + \frac{Ki0.5}{60} + \frac{60(1.9866\text{^} - 3)}{0.5} = 37.53 \rightarrow Ki = \frac{7.451(60)}{0.5} \rightarrow \boldsymbol{Ki = 894.19}$$

- Luego de exportar el controlador1 señal seudo al workspace (Anexo 7, Figura A7.23), analizando con sisotool se obtiene lo siguiente función de transferencia "C1". Ver Figura 67 Función de Transferencia C1 seudo.

```
>> tf(C1)

ans =

  85.06 z^2 - 70.81 z + 0.4767
  ----------------------------
            z^2 - z

Sample time: 0.5 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Fig. 67 Función Transferencia C1.

Tomando (56) e igualando con la función de transferencia PID, Ver figura 67

$$\frac{z^2 - 60.82z + 0.4767}{z2 - z} = Kpz^2 - Kpz + \frac{Ki\Delta t\, z^2}{60} + \frac{60Kdz^2}{\Delta t} - \frac{120Kdz}{\Delta t} + \frac{60Kd}{\Delta t}$$

1. $$Kpz^2 + \frac{Ki\Delta t\, z^2}{60} + \frac{60Kdz^2}{\Delta t} = 76.03z^2 \quad (59)$$

2. $$-Kpz - \frac{120Kdz}{\Delta t} = -60.82z \quad (60)$$

$$\frac{60Kd}{\Delta t} = 0.4767 \rightarrow Kd = \frac{0.4767(0.5)}{60} \rightarrow \boldsymbol{Kd = 3.9725^{-3}}$$

Despejando **Kd** en 59 obtenemos

$$-Kp - \frac{120(3.9725^{-3})}{0.5} = -70.81 \rightarrow -Kp = -70.81 + 0.9534 \rightarrow \boldsymbol{Kp = 69.8566}$$

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Despejando **Kp** en 59 obtenemos

$$69.85 + \frac{Ki0.5}{60} + \frac{60(3.9725^{-3})}{0.5} = 85.06 \rightarrow Ki = \frac{14{,}733(60)}{0.5} \rightarrow \boldsymbol{Ki = 1767.99}$$

5. Controladores

5.1 Configuración Bloque PID Rslogix 500

El software Rslogix 5000, proporciona el bloque PIDE de fácil configuración y que permite administrar las ganancias correspondientes a un control PID, la configuración se realiza siguiendo los datos proporcionados por Allen Bradley [18], a continuación se describe las configuraciones que se realizaron para el control PID Ver Figura 68 Bloque PIDE.

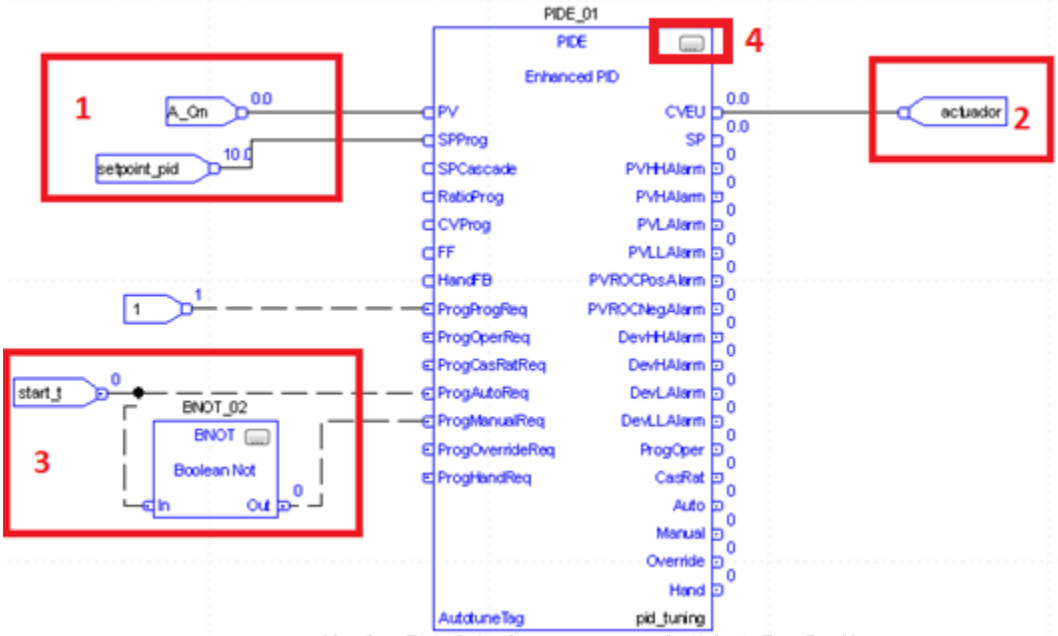


Fig. 68 Bloque PIDE

La variable del proceso (PV), es la entregada por el trasmisor de nivel, teniendo en cuenta los datos obtenidos y la linealización que se desarrolló para la altura, se implementó un programa para ingresar la ecuación de regresión lineal ver Figura 30.del sensor de nivel y obtener salida en Cm.

La configuración del Set_point (SPProg) se hasta la altura máxima 39cm que representa el 100%. La variable de control (CVEU) es la generada hacia el actuador mediante el variador de velocidad realizando una inyección por variación de frecuencia, que también se limita hasta los 60Hz (600) como máximo y 38Hz (380)

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

como mínimo. Ver Figura 69 Limitar variable de control (Cv) y Figura 70. Ingreso de constantes PID.

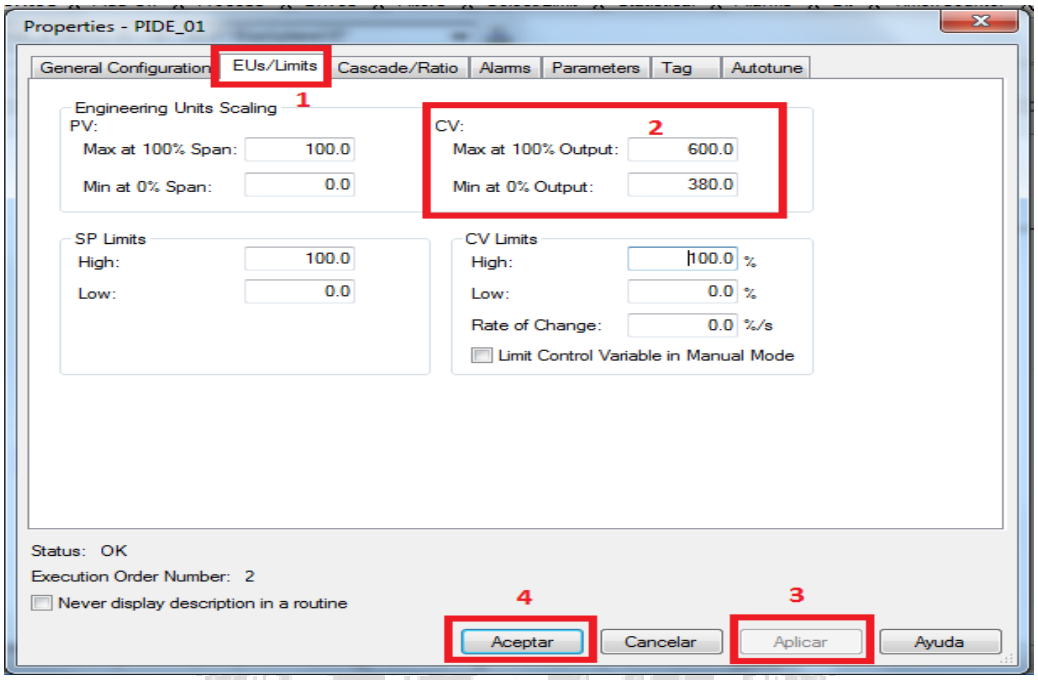


Fig. 69 Limitar Variable de Control CV.

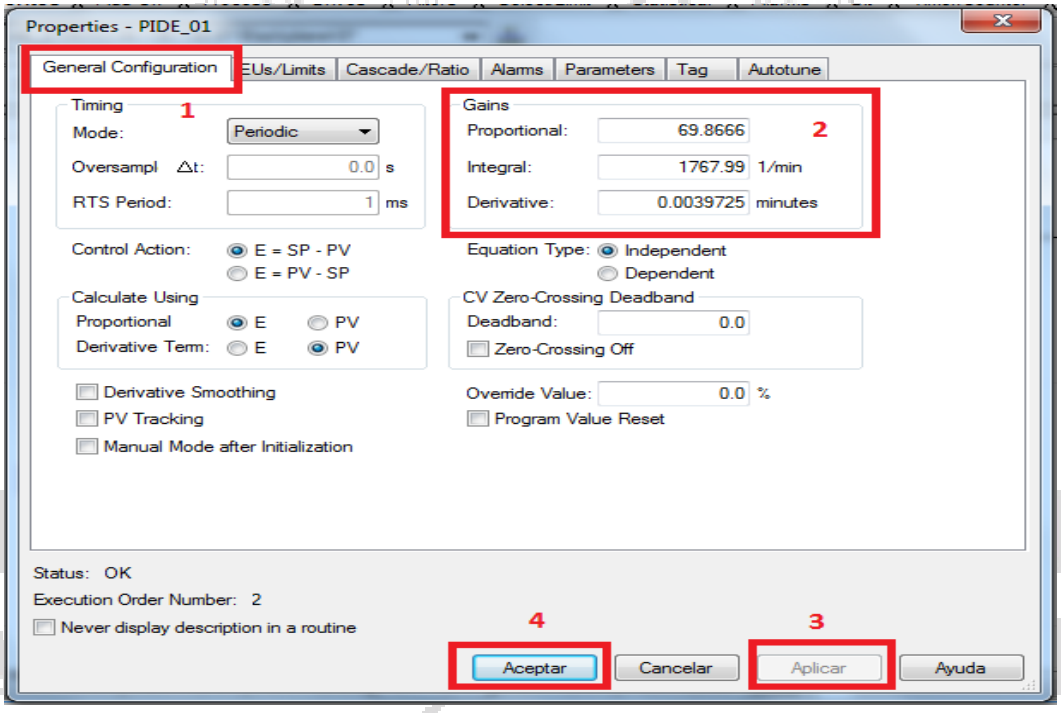


Fig. 70 Ingreso de constantes PID

5.1.1 PID, Pruebas, Simulación

Se realizaron las respectivas pruebas para nuestros dos controladores PID desarrollados, ingresando las constantes obtenidas en el bloque PIDE. Ver Figura 70, con el fin de verificar y observar su comportamiento para diferentes niveles de Set_point (Cm). El controlador de la Figura 66, posee una tiempo de estabilización y sobre impulso mucho mayor que con el controlador de la Figura 67. Ver Anexo 8.

Simulación PID

La manera en la cual se cargó el controlador de la figura 67 en el bloque "LTI System" al modelo global del tanque de agua caliente. Ver Figura 71 se muestra en el Anexo 9, se realizó una estimulación de manera de simulación, los resultados se observan en el anexo 10.

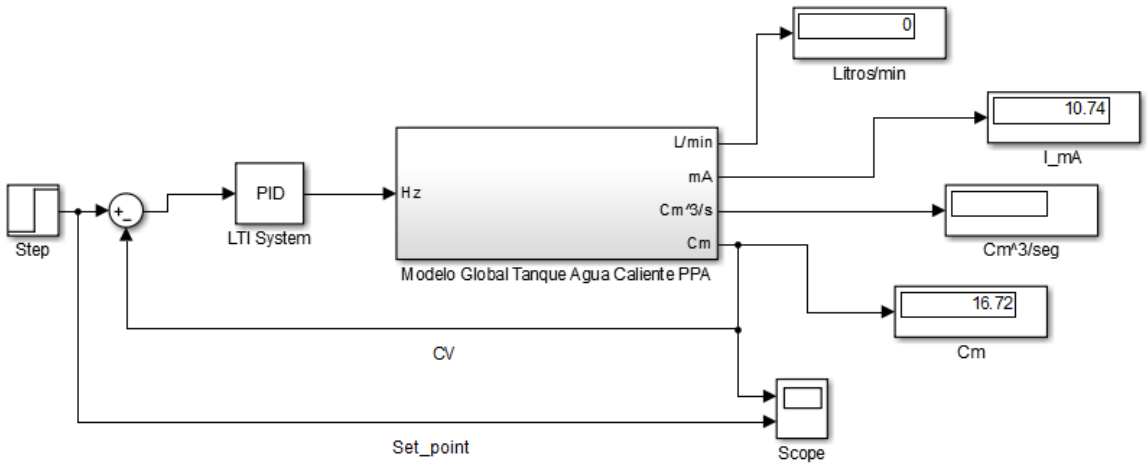


Fig. 71 Modelo Global PID Simulado

5.2 Configuración Control ON_OFF

Teniendo en cuenta que el proceso de calentamiento del agua, proceso lento y las condiciones en las cuales la PPA necesita calentar 22 Litros para poder ser entregados al tanque de mezcla de la PPA, se realizó el siguiente programa Ver Figura 72 Control ON_OFF, el cual realiza un comparación con el rango de temperatura máximo y la condición simplemente cuando el sensor entregue esa temperatura permita apagar la resistencia calefactora, con el fin de asegurar que el agua se encuentra en la temperatura deseada y lista para entregar.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

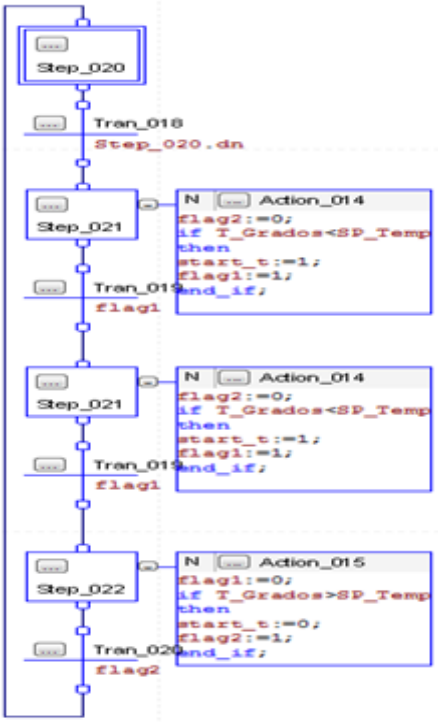


Fig. 72 Control ON_OFF

5.3 On_Off Pruebas, Simulación

Se realizó la respectiva prueba para nuestros controladores On_Off de temperatura, mediante la estimulación en 3 puntos diferentes de referencia. Ver Anexo 11.

Simulación ON_OFF

Figura 73 muestra simulación control On_Off, en el anexo 12 simulación de diferentes referencias de temperatura mediante Simulink, Matlab2015a

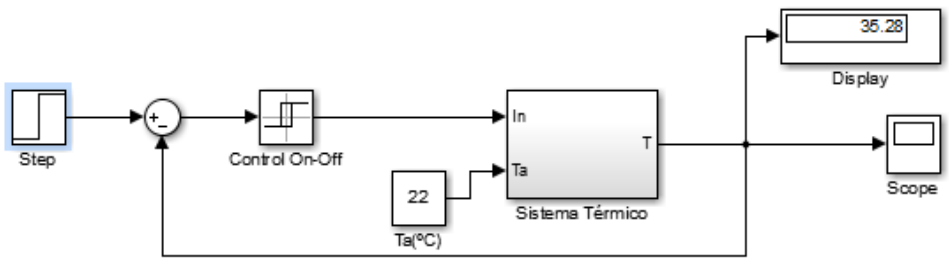


Fig. 73 Simulación Control ON_OFF

5.4 HMI (Scada)

Para el sistema de visualización se desarrolló una aplicación, con el fin de manipular el sistema y visualizar el comportamiento que presenta el tanque, para tal fin de desarrollaron las siguientes ventanas que se describen a continuación.

- **Ventana Principal**, se encuentra el nombre del proyecto referente al tanque que se desea controlar, además de los autores del proyecto, tenemos un botón que nos permite acceder a la ventana de control que se desee Nivel o Temperatura, un botón para salir de la aplicación ”Shutdown”. Ver Figura 74. Ventana Principal.



Fig. 74 Pantalla Principal

- **Ventana Control de Nivel,** mediante esta ventana Ver Figura 75, el estudiante podrá ingresar a la interfaz para controlar el nivel del líquido, donde además podrá observar la altura (Cm) la corriente en lazo 4-20mA, botón “Start” para prender nuestra bomba, botón “Start_PID” para dar inicio a nuestro controlador PID, “Set_point” el cual permite ingresar la altura de referencia a la cual se va controlar el nivel del líquido, también cuenta con el botón “main” para regresar la ventana principal Ver Figura 74, botón “Trend” acceder a la ventana graficas que permite ver el comportamiento de las variables.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

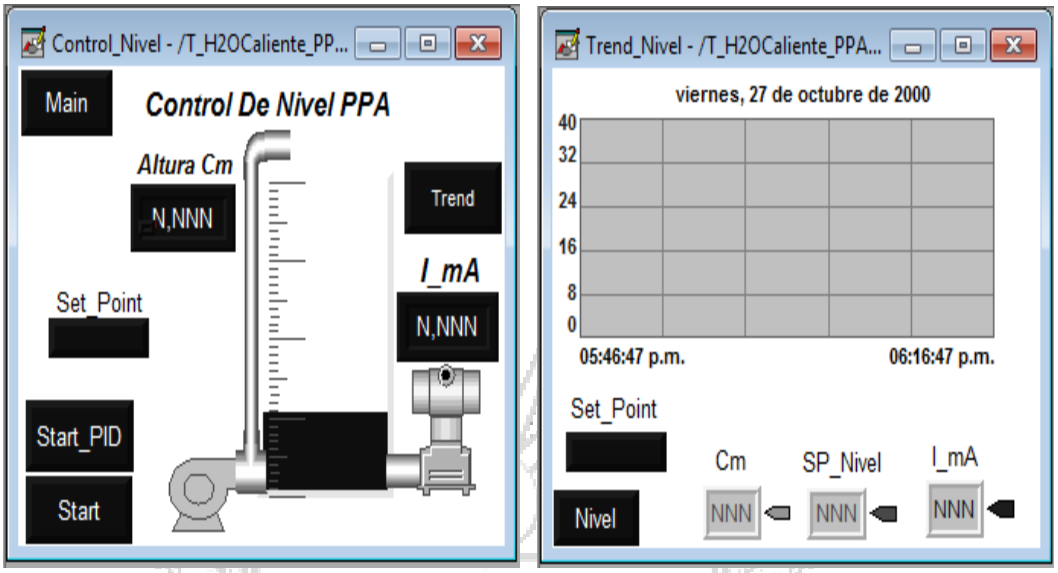


Fig. 75 Interfaz y Trend de Nivel

- **Ventana Control de Temperatura,** mediante esta ventana Ver Figura 76, el estudiante podrá ingresar a la interfaz para controlar la temperatura del líquido, donde además podrá observar el volumen (Litros), la temperatura en grados centígrados (ºC), botón "Start" para prender nuestra bomba, para llevar el agua al volumen requerido 22 Litros, "Set_point" el cual permite ingresar la temperatura de referencia a la cual se va controlar, también cuenta con el botón "main" para regresar la ventana principal Ver Figura 74, botón "Trend" acceder a la ventana graficas que permite ver el comportamiento de las variables.

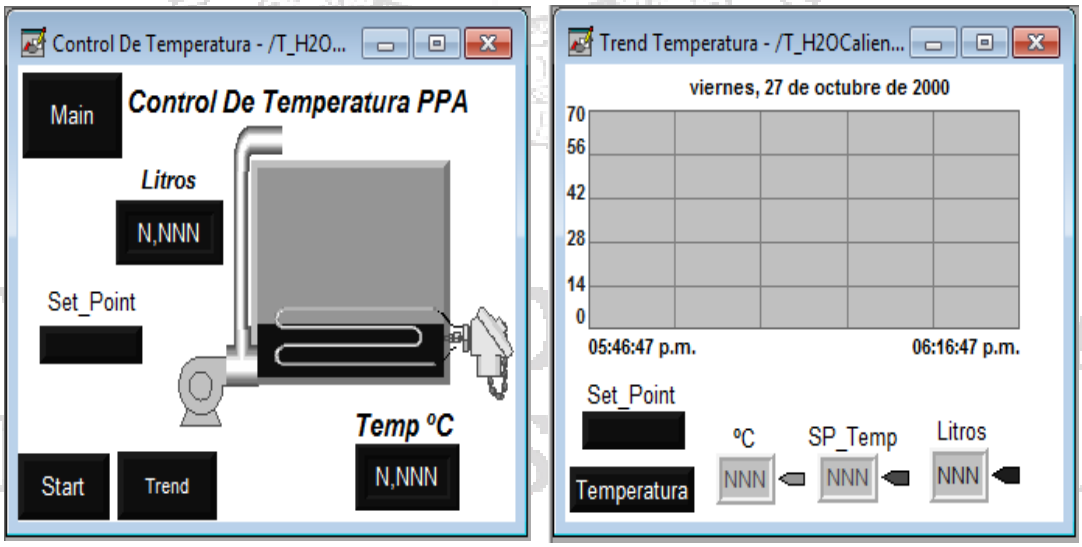


Fig. 76 Interfaz y Trend de Temperatura.

Laboratorio Control de Nivel

Objetivos

Desarrollar e implementar el control de nivel en el tanque de agua caliente (superior) de La Planta de Procesos Análogos (PPA), teniendo como actuador el Motor_Bomba y como sensor el transmisor de presión diferencial Rosemount 2051c.

Identifique la señal del trasmisor de nivel y compare con la medida de nivel que se encuentra en el tanque (Regleta), para obtener la linealidad del sensor y desarrollar el programa en el PLC que deberá ser visualizado en la HMI.

Esquema General

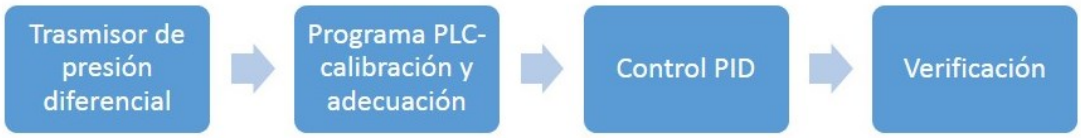


Diagrama de Bloques

Desarrollo

1. El estudiante deberá identificar la corriente entregada por el trasmisor del presión diferencial Rosemount 2051c, hallando la relación con las regletas de nivel en Cm o Litros que se encuentran en el tanque de agua caliente (superior) la PPA.

2. Desarrolle e implemente un programa en el PLC Allen-Bradley 1769_L23E_QB1B, agregando el variador PowerFlex40-E, Módulo de entradas análogas 1769-IF4.

3. Implemente la relación de Cm vs mA, obtenidos en el paso 1 en rslogix500 y configure el bloque PIDE con las siguientes constantes Kp=69.8566, KI=1767.99, KD=3.9725^{-3}

4. Realice una visualización en la HMI Panelview plus 600 de Allen-Bradley, en el cual pueda relacionar y manipular las constantes creadas en el paso 3

5. Una vez realizado el programa, efectué el control desde la HMI únicamente para los siguientes niveles (Set_point), tome datos propuestos y grafíquelos.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Set_point (cm)	Corriente entregada por el transmisor (mA)	Valor Medido (Cm)
5		
10		
15		
20		
25		
30		
35		

Laboratorio Control de temperatura

Objetivos

Identificar la señal de la termocupla tipo J y comparar con un patrón de comparación (multímetro, cámara térmica u otro dispositivo para medir temperatura), para obtener la linealidad del sensor y desarrollar el programa en el PLC que deberá ser visualizado en la HMI.

Desarrollar e implementar el control de temperatura en el tanque de agua caliente (superior) de La Planta de Procesos Análogos (PPA), teniendo como actuador la resistencia eléctrica y como sensor la termocupla tipo J.

Esquema General



Diagrama de Bloques

Desarrollo

1. El estudiante deberá identificar la corriente entregada por el trasmisor de 4mA a 20mA de la termocupla tipo J, que se encuentran en el tanque de agua caliente (superior) la PPA.

UNIVERSITARIA FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

2. Con un patrón de comparación y los datos entregados por el PLC efectué la regresión lineal del sensor de temperatura Termocupla tipo J

3. Implemente un control On_Off de temperatura en le PLC para el tanque de agua caliente de la PPA

4. Realice una visualización en la HMI Panelview plus 600 de Allen-Bradley, en el cual pueda relacionar y manipular las constantes creadas

Conclusiones

La planeación enfocada a la selección de los sensores previo a su adquisición se debe realizar detalladamente teniendo en cuenta las características del sistema donde se desea implementar el sensor como: rango de temperatura, tipo de líquidos, materiales de fabricación, tamaño, etc., ya que de lo contrario se puede hacer adquisición de instrumentos inoficiosos para la planta y reflejado en la perdida de dinero y tiempo de ejecución.

El variador de velocidad del motor genera frecuencias que generan alteraciones en la señal entregada por el sensor termopar tipo J durante su transmisión. Teniendo en cuenta lo anterior se adquirió un termo-poso con su bulbo obteniendo protección de las frecuencias presentes en la PPA y entregando una lectura más confiable.

La ubicación del sensor de presión diferencial de debe realizar a nivel de la base del tanque para que su lectura coincida con la presión ejercida por el agua y asegurándose que en la entrada del sensor no estén presentes burbujas de aire las cuales alteran la medición del sensor.

El modelo del tanque se obtiene mediante un proceso experimental que permite calcular el caudal de salida, si la planta contara con sensores de flujo el modelo del tanque sería más cercano a la realidad.

Se desarrollaron dos tipos de control PID, mediante el método del lugar de las raíces obtenidos de la estimulación del sistema a través de una señal cuadrada y una señal aleatoria teniendo como resultado mejor comportamiento del controlador PID con la señal aleatoria.

Durante el desarrollo del control del temperatura ON_OFF se encontró que la lectura del sensor de presión diferencial varia respecto a la temperatura del agua; entre

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

más caliente el agua la señal del sensor disminuye teniendo en cuenta que es abierto a la atmosfera afectando la presión del fluido del proceso del tanque. Si el tanque fuera cerrado a la atmosfera, cuando se aumenta la temperatura del fluido aumentaría los datos entregados por el sensor de presión diferencial puesto que la presión aumenta en el interior del tanque.

El tiempo de respuesta del sensor termopar instalado en el tanque de agua caliente de la PPA es mayor en comparación con los instrumentos para la toma de patrón de temperatura debido al sistema de protección; bulbo, termo-poso y el trasmisor de 4 a 20 mA, situación que se debe de tener en cuenta a la hora de realizar análisis de los laboratorios para evitar mediciones erróneas.

El sistema de supervisión, control y adquisición de datos *SCADA* diseñado para el tanque de agua caliente de la PPA no corresponde con la definición conceptual debido a que el proceso que se desarrolla actualmente en el tanque no corresponde a un proceso de obtención de un producto específico, ni a la realización completa de un proceso.

La selección, implementación, montaje, instalación y acoplamiento de sensores industriales se deben ejecutar de manera planeada y metódica de acuerdo con el proceso que se requiere analizar ya sea de temperatura o de nivel para obtener el objetivo determinado, para este caso; diseñar un sistema de control PID de nivel y control ON_OFF de temperatura para el tanque de agua caliente de la PPA, con interacción al usuario mediante pantalla HMI, tomando las acciones requeridas para concluir exitosamente en el tiempo requerido, de caso contrario se verá reflejado en el recurso económico que se cuenta para el desarrollo del objetivo planteado inicialmente.

Los laboratorios propuestos en la monografía están enfocados a los estudiantes para que realicen prácticas de procesos de control, instrumentación, procesos industriales, programación de autómatas (PLC) y la HMI, mejorando su aprendizaje.

Recomendaciones

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Se recomienda efectuar un análisis de seguridad industrial enfocado en mantener ambientes de trabajo libres de accidentes por posibles descargas eléctricas, teniendo en cuenta que utiliza línea trifásica y monofásica, riesgos por superficies calientes, peligros por atrapamiento; aplicando principios de bloqueo / etiquetado, entre otros e implementar modificaciones, señalizaciones y toda mejora que genere seguridad a los estudiantes y docentes de la universidad que manipulen la PPA.

Durante el proceso de control de temperatura, no se debe elevar la temperatura mayor a 70 °C, teniendo en cuenta el material con el que está hecho los tanques es el polímero de metil metacrilato PMMA, conocido comúnmente como acrílico que a determinada temperatura pierde la capacidad de soportar tensión y se puede deformar, cambiando las características y comportamiento del sistema, así como el deterioro o fatiga del material a largo plazo.

Se debe implementar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo de la bomba, el motor y el acople de ellos, para garantizar el correcto funcionamiento y la vida útil de estos actuadores, teniendo en cuenta que son indispensable para el correcto funcionamiento de la PPA.

Para mejorar el modelo del sistema general de la PPA, se puede lograr implementando sensores de flujo donde se requiera, teniendo en cuenta que el modelo realizado en esta monografía se efectuó de manera experimental; promediando el volumen del tanque vs tiempo de llenado a diferentes velocidades del motor bomba.

Mantenimiento a los tanques (limpieza) por deterioro del agua y cambio de la misma, aplicando bicarbonato de sodio previniendo el óxido y azul de metileno para eliminar bacterias.

Referencias

[1] Z. B. J. Benitez Cadena Victor, «Esculea Politécnica Nacional,» 2005. [En línea]. Available: http://docentes.uni.edu.ni/fec/Alejandro.Mendez/Nivel2.pdf. [Último acceso: 23 02 2015].

[2] D. F. BI Shujiao, «Rvista IEE,» 12 07 2012. [En línea]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6390206&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxpls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6390206. [Último acceso: 26 02 2015].

[3] R. D. J. Olarte Silva Leidy. [En línea]. Available: repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/.../1290/.../digital_20469.pdf. [Último acceso: 15 01 2015].

[4] P. G. J. A. y. C. S. O. Anzurez M. Juan, «RIEE&C, REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN,» 12 2008. [En línea]. Available:

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

http://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v5/art2_diciembre2008.pdf. [Último acceso: 18 01 2015].

[5] K. Ogata, Ingenieria de Control Moderna, Madrid: Pearson Edcuación S.A, 2010.

[6] C. I. Oscar, «Series Taylo y Forurier,» 2005. [En línea]. Available: http://www.ugr.es/~acanada/excursiones/Taylor_Fourier.pdf. [Último acceso: 28 01 marzo].

[7] biblioises, «biblioises,» [En línea]. Available: http://www.biblioises.com.ar/Contenido/500/530/A%2013%20Term%20odinamica.pdf. [Último acceso: 15 03 2015].

[8] T. Information, «Abb,» [En línea]. Available: http://www08.abb.com/global/scot/scot206.nsf/veritydisplay/bb949b50a265ef08c1257bf6004ccab3/$file/TI_266-EN_B-09_2013.pdf. [Último acceso: 29 01 2015].

[9] K. Ogata, Sistemas de control en tiempo discreto, Pearson Educaciñon, 1996.

[10] M. M. luis. [En línea]. Available: http://www.ingenierias.ugto.mx/profesores/ljavier/documentos/Lec03%20-%20Sistemas%20en%20Tiempo%20Discreto.pdf. [Último acceso: 02 04 2015].

[11] V. Mazzone, «Automatización y Control Industrial,» 03 2002. [En línea]. Available: http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf. [Último acceso: 02 04 2015].

[12] E. J. Warchol, «Alinement and modeling of hanford ecitation control for system damping,» IEE Transactions.

[13] A. Bradley, «CompactLogix,» [En línea]. Available: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/qs/iasimp-qs010_-en-p.pdf. [Último acceso: 20 10 2014].

[14] Allen-Bradley, «1769-lF4,» [En línea]. Available: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/1769-in048_-es-p.pdf. [Último acceso: 20 febrero 2015].

[15] Rosemount, «Rosemount 2051,» 2008. [En línea]. Available: http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/pm%20rosemount%20documents/00809-0109-4101.pdf. [Último acceso: 18 01 2015].

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

[16] A. Bradley, «Panel View plus 600,» [En línea]. Available: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/2711p-um001_-en-p.pdf. [Último acceso: 25 01 2015].

[17] A. Bradley, «Power Flex 40,» [En línea]. Available: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/qs/iasimp-qs029_-es-p.pdf. [Último acceso: 10 03 2015].

[18] R. Automation, «PIDE,» [En línea]. Available: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/logix-wp008_-en-p.pdf. [Último acceso: 02 03 2015].

[19] A. C. Solé, Instrumentacion Industrial, Mexico, D. F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., 1997.

[20] J. A. Sanchez, Control Avanzado de Procesos: Teoria y Practica, Madrid España: Diaz de Santos S. A., 2003.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS