



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA



TESIS

**CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE CONTROL
DE TEMPERATURA DE UN TANQUE DE AGUA PARA LA
CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE LA ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

AUTORES

Bach. Manuel Jesus Paiva Castro

Bach. Edgar David León Abad

ASESOR

Ing. Ramírez Castro Manuel Javier

LAMBAYEQUE – PERÚ

2019

TESIS

CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE CONTROL DE TEMPERATURA
DE UN TANQUE DE AGUA PARA LA CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE LA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD
NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRONICO

AUTOTRES



Bach. Paiva Castro Manuel Jesus



Bach. Leon Abad Edgar David

ASESOR



Ing. Ramirez Castro Manuel Javier

TESIS

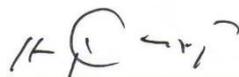
CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UN TANQUE DE AGUA PARA LA CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO



MG. Ing. Martín Augusto Nombera Lossio
PRESIDENTE



Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla
SECRETARIO



Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera
VOCAL

LAMBAYEQUE, PERÚ
2019

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a nuestros padres por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

Agradecemos a nuestros docentes de la Escuela de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión.

DEDICATORIA

A mis padres, por estar conmigo, por enseñarme a crecer y hacer frente ante los obstáculos que se puedan presentar , por apoyarme y guiarme, por ser las bases que me ayudaron a llegar hasta aquí.

El presente trabajo es dedicado a mi familia, a mi esposa quienes han sido parte fundamental para desarrollar este trabajo, ellos son quienes me dieron grandes enseñanzas y los principales protagonistas de este “sueño alcanzado.

Esta tesis está dedicada a mi padre, quien me enseñó que el mejor conocimiento que se puede tener es el que se aprende por sí mismo. También está dedicado a mi madre, quien me enseñó que incluso la tarea más grande se puede lograr si se hace un paso a la vez.

RESUMEN

El presente proyecto de tesis tuvo como objetivo principal construir un módulo didáctico de control de temperatura de un tanque de agua para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

El diseño del sistema automático, se realizó desarrollo un programa secuencial de Diagrama de Escalera (LADDER) en un PLC Modicon BMXP342020, donde manejamos 5 Variables de Entradas Discretas, 2 entradas analógica, 3 Variables de Salida discreta, 1 de salida analógica. La comunicación del PLC con las resistencias eléctricas es por medio de sus puertos analógicos, el sistema será activado desde un tablero de control local. El programa en modo automático hará que la bomba impulse agua hasta que este llegue al nivel deseado y así automáticamente variar la potencia de las resistencias para que el agua llegue a la temperatura deseada y en modo manual la potencia de las resistencias variara proporcional al giro del potenciómetro.

Se concluye; que la construcción de un Módulo didáctico de control de temperatura de un tanque de agua sirve para demostrar las competencias adquiridas en el área de automatización y control por parte de los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

ABSTRACT

The main objective of this thesis project was to build a didactic module for the temperature control of a water tank for the training of students of the electronic engineering professional school of the Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. The design of the automatic system was carried out by developing a sequential ladder diagram program (LADDER) in a Modicon BMXP342020 PLC, where we handled 5 discrete input variables, 2 analog inputs, 3 discrete output variables, and 1 analog output. The communication of the PLC with the electrical resistors is through its analog ports, the system will be activated from a local control panel. The program in automatic mode will cause the pump to drive water until it reaches the desired level and thus automatically vary the power of the resistances so that the water reaches the desired temperature and in manual mode the power of the resistances will vary proportional to the rotation of the potentiometer. It concludes; that the construction of a didactic module for temperature control of a water tank serves to demonstrate the skills acquired in the area of automation and control by students of the Professional School of Electronic Engineering of the National University Pedro Ruiz Gallo.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

CAPITULO I	15
ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.1. Aspecto Informativo.....	16
1.1.1. Titulo.....	16
1.1.2. Personal Investigador	16
1.1.3. Línea de Investigación.....	16
1.1.4. Lugar de ejecución.....	16
1.1.5. Duración estimada del proyecto.....	16
1.2. Aspecto de la investigación.	16
1.2.1. Síntesis de la situación problemática	16
1.2.2. Formulación del Problema de investigación.	17
1.2.3. Hipótesis.....	17
1.2.4. Objetivos	17
1.2.5. Antecedentes.	18
CAPITULO II	20
MARCO TEÓRICO.....	20
2.1. Automatización Industrial	21
2.2. Sistemas de Control.....	21
2.2.1. Elementos en un sistema de control.....	22
2.2.2. Sistema de Control de Lazo Abierto	23
2.2.3. Sistema de Control de Lazo Cerrado	24
2.3. Módulos didácticos para el control de procesos industriales	24
2.3.1. Tipos de módulos didácticos de control.....	25
2.3.2. Finalidad de un módulo didáctico de control.....	28

2.4.	Controladores Lógicos Programables	29
2.4.1.	Clases de PLC	29
2.5.	Instrumentos Industriales.....	32
2.5.1.	Sensores.....	32
2.5.2.	Actuadores.....	38
2.6.	HMI.....	39
2.6.1.	Definición.....	39
2.6.2.	Tipos.....	40
2.7.	Función de Transferencia	40
2.7.1.	Identificación paramétrica de sistemas	42
2.7.2.	Métodos de sintonización de controladores PID.....	57
CAPITULO III		65
DISEÑO DEL SISTEMA		65
3.1.	Introducción	65
3.2.	Descripción del Sistema	66
3.3.	Descripción física del sistema	66
3.4.	Identificación de Señales de Control y Monitoreo.....	67
3.5.	Diagrama de bloques del sistema de control.....	67
3.6.	Diagrama P&ID.....	67
3.7.	Selección de Equipos.....	68
3.7.1.	Especificación de Instrumentación	69
3.7.1.1.	Resistencia eléctrica 2000w.....	69
3.8.	Especificación del Sistema de Control	71
3.8.1.	Unidad Central de Procesamiento.....	72
3.8.2.	Módulo de Entradas y Salidas	72
3.9.	Especificaciones del HMI.....	75
3.10.	Especificaciones del Software de Programación del PLC.....	76
3.10.1.	Unity Pro	76

3.11.	Especificaciones del Software de Programación del HMI	77
3.11.1.	Vijeo Designer.....	77
3.12.	Funcionamiento del Sistema.....	78
3.12.1.	Modo Manual	78
3.12.2.	Modo Automático.....	78
3.13.	Determinación del modelo matemático de la planta	78
3.13.1.	Rango de linealidad de la planta	78
3.13.2.	Obtención del modelo mediante la respuesta al escalón	80
3.8.	Determinación y simulación del controlador en Matlab	83
3.9.	Programación PLC	88
3.9.1.	Direccionamiento de variables en el PLC	88
3.9.2.	Dimensionamiento del Bastidor.....	88
3.9.3.	Configuración Red Ethernet PLC	89
3.9.4.	Variables en el Software del PLC	89
3.9.1.	Programa para PLC	90
3.10.	Programación HMI.....	94
3.10.1.	Panel para TPC del Módulo de Temperatura	94
3.11.	Presupuesto.....	96
3.11.1.	Costos de Hardware.....	96
3.11.2.	Costos de Software	96
3.11.3.	Costos totales.....	97
CAPITULO IV		98
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		98
CAPITULO V		100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de Control de lazo abierto.	23
Figura 2: Sistema de control en lazo cerrado.	24
Figura 3: Ejemplo de un Módulo Didáctico de Control.	26
Figura 4: Diagrama Módulo Control de presión.	27
Figura 5: Diagrama Control de Temperatura en un intercambiador de calor.	27
Figura 6: Diagrama Módulo de Control de Nivel de líquido.	28
Figura 7: PLC compacto S7-1200.	30
Figura 8: PLC Modular Allen Bradley.	31
Figura 9: PLC Compacto – Modular.	32
Figura 10: Tubo de Bourdon sencillo.	32
Figura 11: Medidor magnético de flujo.	33
Figura 12: Medidor de flujo de turbina.	34
Figura 13: Instalación de transmisores de diferencial de presión en recipientes abiertos y cerrados.	35
Figura 14: Sensor de nivel con flotador.	35
Figura 15: Sensor de nivel de burbujas de aire.	36
Figura 16: Esquema de un termómetro de resistencia. a) Ensamblaje, b) componentes.	37
Figura 17: Puente de Wheatstone de dos hilos y de tres hilos.	37
Figura 18: Construcción de un termistor típico.	38
Figura 19: Respuesta del sistema de 1º orden puro.	44
Figura 20: Respuesta del sistema de 1º orden con retardo.	45
Figura 21: Respuestas de sistemas con polos reales múltiples.	46
Figura 22: Parámetros de Strejc.	47
Figura 23: Número de polos múltiples.	47
Figura 24: Respuesta de un sistema de polos distintos.	48
Figura 25: Respuesta de un sistema estándar de segundo orden.	49
Figura 26: Respuesta de un sistema estándar de segundo orden con retardo.	50
Figura 27: Representación Amplitud / Frecuencia.	51
Figura 28: Representación Desfase / Frecuencia.	51
Figura 29: Comprobación Magnitud, oscilación a partir de 0.5 Hz.	52
Figura 30: Comprobación Fase.	53
Figura 31: Proceso de muestreo.	53
Figura 32: Señales de entrada usuales.	54
Figura 33: Importación de datos en Ident.	56

Figura 34: Respuesta a la entrada escalón en Ident.	56
Figura 35: Función de transferencia en Ident.	57
Figura 36: Control PID de una planta.	57
Figura 37: Curva de respuesta en forma de S.	59
Figura 38: Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional.....	60
Figura 39: Oscilación sostenida con periodo P_{cr} (P_{cr} se mide en seg.).....	61
Figura 40: Diagrama de bloques del sistema.....	67
Figura 41: Diagrama P&ID del sistema.	68
Figura 42: Resistencia calefactora de 2 KW	69
Figura 43: Sensor PT 100.....	70
Figura 44: Transductor PT 100.	71
Figura 45: PLC Modicon BMXP342020	72
Figura 46: Módulo de entradas y salidas analógicas BMXAMM0600.....	73
Figura 47: Módulo de entradas y salidas digitales BMXDDM3202K.....	74
Figura 48: HMISTU855.....	75
Figura 49: Logo Unity Pro XL.....	77
Figura 50: Curva estática de la planta.	80
Figura 51: Curva estática de la planta para un cambio de 0% a 30% de potencia.	81
Figura 52: Curva estática de la planta para un cambio de 0% a 50% de potencia.	81
Figura 53: Curva estática de la planta para un cambio de 0% a 70% de potencia.	82
Figura 54: Código fuente en Matlab.	84
Figura 55: Respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado.....	85
Figura 56: Código para obtener la respuesta al escalón con $K_p = 3$	85
Figura 57: Respuesta al escalón con $K_p = 3$	86
Figura 58: Código para obtener la respuesta al escalón con $K_p = 3$ y $K_i = 4$	86
Figura 59: Respuesta al escalón con $K_p = 3$. Y $K_i = 4$	87
Figura 60: Bastidor.	88
Figura 61: Ethernet PLC.	89
Figura 62: Variables PLC.	89
Figura 63: Programa PLC.	90
Figura 64: Programa PLC.	90
Figura 65: Programa PLC.	91
Figura 66: Programa PLC.	91
Figura 67: Programa PLC.	92
Figura 68: Programa PLC.	92
Figura 69: Programa PLC.	93
Figura 70: Programa PLC.	93

Figura 71: Panel bienvenida HMI.....	94
Figura 72: Pantalla principal HMI.....	95
Figura 73: Pantalla control HMI.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr} (primer método).	60
Tabla 2: Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr} (segundo método).	61
Tabla 3: Descripción Local Box.....	66
Tabla 4: Señales de control y monitoreo.	67
Tabla 5: Valores obtenidos haciendo pruebas experimentales.....	79
Tabla 6: Direccionamiento de variables en el PLC.	88
Tabla 7: Costos de Hardware.	96
Tabla 8: Costos de Software.....	96
Tabla 9: Costos totales.	97

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis tiene como finalidad construir un Módulo didáctico de control de temperatura de un tanque de agua para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Este módulo permitirá que los estudiantes puedan conocer más acerca de este proceso y así desarrollar prácticas de laboratorio en clase.

En el Capítulo I: ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN, se presentan los hechos preliminares que condujeron al desarrollo de la tesis tal como la situación problemática, la justificación e importancia de la investigación, los objetivos, la formulación de la hipótesis y el diseño metodológico.

En el Capítulo II: MARCO TEÓRICO, se define la base teórica que servirá para el desarrollo y sustento de la investigación, definiendo conceptos necesarios para entender el funcionamiento del módulo de control de temperatura, de los instrumentos y actuadores y los PLC.

En el Capítulo III: DISEÑO DEL SISTEMA, se realiza el diseño del sistema de control, con un PLC programado en LADDER, programa para el HMI, así como la selección de equipos e instrumentos idóneos para el correcto funcionamiento del sistema, de acuerdo con las características del proceso; definimos los parámetros de diseño y evaluación del cumplimiento de estos.

En el Capítulo IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, aparecen las razones fundamentales por las que consideramos que el desarrollo de nuestro proyecto de tesis es correcto y viable; adicionalmente, se muestran algunas recomendaciones para su mejora.

Finalmente se puede concluir que el trabajo de investigación permite aplicar por parte del alumno el correcto aprendizaje teórico y procedimientos prácticos; tales como, afianzar su conocimiento en la construcción del módulo de control de temperatura de un tanque de agua.

ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN

CAPITULO I

1.1. Aspecto Informativo

1.1.1. Título.

Construcción de un Módulo didáctico de control de temperatura de un tanque de agua para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

1.1.2. Personal Investigador

1.1.2.1. Autor

Nombre : Manuel Jesus Paiva Castro
E – mail : Manuel.paiva.castro@hotmail.com
Teléfono : 935454660

1.1.2.2. Autor

Nombre : Edgar David León Abad
E – mail : León_ed_1193@hotmail.com
Teléfono : 962094420

1.1.2.3. Asesor

Ing. Manuel Javier Ramírez Castro

1.1.3. Línea de Investigación

Ingeniería Electrónica – Control y Automatización

1.1.4. Lugar de ejecución

Chiclayo.

1.1.5. Duración estimada del proyecto.

4 meses.

1.2. Aspecto de la investigación.

1.2.1. Síntesis de la situación problemática

En la actualidad, hay un proceso de recambio en cuanto a la formación universitaria, esto se da en el marco de la nueva ley universitaria del 2014 que busca elevar los estándares de calidad en la formación profesional. A nivel de carreras profesionales de ingeniería es necesaria la implementación de equipamiento tecnológico moderno para la enseñanza práctica donde el estudiante involucre los

conceptos teóricos que le permita interactuar con esta tecnología y este más preparado cuando ingrese al mercado laboral.

La Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo cuenta con equipos para la capacitación de los estudiantes en las distintas áreas de la electrónica pero que aún es insuficiente dado la cantidad de alumnos y la falta de presupuesto.

En el área de la automatización de procesos se cuenta con dos módulos, el primero de control de presión y el segundo para un control de nivel. Ambas cuentan con un PLC, un variador de velocidad y la instrumentación adecuada para su puesta en marcha.

Debido a las competencias que se busca en un egresado de la carrera profesional de Ingeniería Electrónica es importante también conocer el proceso de control de temperatura, por lo que se hace necesario contar con un módulo para este fin.

Con este módulo la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica tiene una herramienta más para mejorar la formación académica de los estudiantes en el área de automatización y control.

1.2.2. Formulación del Problema de investigación.

¿Cómo construir un Módulo didáctico de control de temperatura de un tanque de agua para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo?

1.2.3. Hipótesis

La construcción de un Módulo didáctico de control de temperatura de un tanque de agua servirá para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

1.2.4. Objetivos

1.2.4.1. Objetivo General

- Construir un Módulo didáctico de control de temperatura de un tanque de agua para la capacitación de los alumnos de la escuela profesional de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

1.2.4.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar el diagrama de proceso e instrumentación (P&ID).
- Seleccionar adecuadamente los sensores y actuadores.

- Plantear el diseño estructural del Módulo.
- Implementar el Módulo.
- Obtener el modelo matemático de la planta.
- Implementar un algoritmo de control PID.
- Implementar las Guías de Práctica.

1.2.5. Antecedentes.

1.2.5.1. Antecedentes Nacionales

1.2.5.1.1. Diseño e implementación de un módulo educativo para el control de temperatura (Repositorio digital de tesis PUCP, 2017), en la Pontificia Universidad Católica del Perú, El objetivo que se busca al desarrollar este proyecto es implementar un sistema de control de temperatura de bajo costo en el módulo educativo control de nivel que se encuentra actualmente en el Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM). Una vez concluido, este módulo permitirá desarrollar conocimientos teórico-prácticos en el campo de control de procesos, así como en el manejo de los equipos involucrados. Para seleccionar adecuadamente los componentes que forman parte del módulo, se establecieron como principales referentes su funcionalidad y su costo de adquisición. Una vez realizada la implementación se obtuvo el modelo matemático de la planta y se desarrolló el algoritmo de control PID, debido a que es frecuentemente empleado por las industrias. Este algoritmo fue implementado utilizando conceptos de control por computadora, y le permitió al sistema operar correctamente los lazos de control dentro del rango de temperaturas de 25 °C a 36 °C. Además, se implementó una interfaz de usuario que permite visualizar gráficamente el comportamiento de las variables del sistema y modificar de manera sencilla los parámetros del controlador que tienen una relación directa con la respuesta.

1.2.5.2. Antecedentes Internacionales

1.2.5.2.1. Diseño y construcción de un módulo didáctico de control de flujo (Researchgate, 2015), en la Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador, En este proyecto se diseña y construye un módulo didáctico de control de flujo, para mejorar el proceso de enseñanza de laboratorio. El módulo fue diseñado y construido de tal manera que pueda tener

varias alternativas de control de la planta, sean estas las diseñadas para esta aplicación, u otras alternativas de control que permitan probar otras propuestas de solución. Para medir el flujo se utilizó un sensor tipo turbina marca KOBOLD debido a su linealidad y exactitud, del orden de $\pm 0.3\%$, y además es de bajo costo. Para el control de la planta se utilizó el Controlador Lógico Programable S7-200 CPU 224XP donde se implementó un algoritmo “PID” de control. El incremento o descenso del flujo se lo hace variando la velocidad de una bomba de inducción, mediante la utilización del variador de velocidad SINAMICS G110. Mediante un selector el flujo puede ser variado y monitoreado de manera local o remota. En modo local se ingresa el valor de consigna desde un display de texto “TD200” ubicado en la parte frontal del panel. En modo remoto el valor de consigna es ingresado desde una interfaz de comunicación Hombre – Máquina desarrollada en InTouch 7.2. Pruebas realizadas mostraron que se puede controlar el flujo desde un punto mínimo que es 0.5 GPM hasta un punto máximo que es de 5 GPM, con un error absoluto de 0.1GPM.

1.2.5.2.2. Diseño de Diseño y construcción de un módulo orientado al desarrollo de prácticas para la materia de control automático bajo la plataforma de Matlab (Universidad Salesiana Ecuador Repositorio Digital , 2011), en la Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil – Ecuador. se El objetivo de esta tesis es ayudar a los estudiantes a entender cómo trabajan dos diferentes sistemas de control desde la plataforma Simulink del software Matlab. El primer módulo está formado por el sistema que controla el nivel de líquido en un tanque y el segundo módulo está formado por el sistema que controla la temperatura Estos módulos se complementan con un amplio análisis que se desarrolla con experimentos y pruebas, cuya finalidad es crear un apropiado sistema de prácticas para los estudiantes de dicha universidad.

MARCO TEÓRICO

CAPITULO II

2.1. Automatización Industrial

La Automatización Industrial es la aplicación de diferentes tecnologías para controlar y monitorear un proceso, maquina, aparato o dispositivo que por lo regular cumple funciones o tareas repetitivas, haciendo que opere automáticamente, reduciendo al mínimo la intervención humana.

Lo que se busca con la Automatización industrial es generar la mayor cantidad de producto, en el menor tiempo posible, con el fin de reducir los costos y garantizar una uniformidad en la calidad.

La Automatización Industrial la encontramos en muchos sectores de la economía, como en la Fabricación de Alimentos, Productos Farmacéuticos, Productos Químicos, en la Industria Gráfica, Petrolera, Automotriz, Plásticos, Telecomunicaciones entre otros, sectores en los cuales generan grandes beneficios. No solo se aplica a maquinas o fabricación de productos, también se aplica la gestión de procesos, de servicios, a manejo de la información, a mejorar cualquier proceso que con lleven a un desempeño más eficiente, desde la instalación, mantenimiento, diseño, contratación e incluso la comercialización. (Crespo, 2011)

2.2. Sistemas de Control

Recordemos que los automatismos y los robots son capaces de iniciar y detener procesos sin la intervención manual del usuario. Para ello necesitarán recibir información del exterior, procesarla y emitir una respuesta; en un automatismo dicha respuesta será siempre la misma, pero en un robot podemos tener diferentes comportamientos según las circunstancias. A esto se le llama un sistema de control.

A la información que recibe el sistema del exterior se le denomina de forma genérica entrada o input. A las condiciones que existen en el exterior después de la actuación (o no actuación) del robot se les denomina de forma genérica salida u output.

Existen dos tipos de sistemas de control de un robot: sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado. (García, Reinoso García, García Aracil, & Aracil Santonja, 2003)

Asociado al control aparecen tres tipos de variables que es necesario conocer para controlar los procesos:

- Variable controlada (CV): Es la característica de calidad o cantidad que se mide y controla. La variable controlada es una condición o característica del medio controlado, entendiendo por tal la materia o energía sobre la cual se encuentra situada esta variable. Por ejemplo, cuando se controla automáticamente la temperatura del

agua de un intercambiador de calor, la variable controlada es la temperatura mientras que el agua es el medio controlado.

- **Variable manipulada (MV):** Es la cantidad o condición de materia o energía que se modifica por el controlador automático para que el valor de la variable controlada resulte afectado en la proporción debida. La variable manipulada es una condición o característica de la materia o energía que entra al proceso. Por ejemplo, en un intercambiador de calor cuando el elemento final de control modifica el caudal de vapor al proceso, la variable manipulada es el caudal mientras que el vapor es la energía de entrada.
- **Variable de perturbación (DV):** Es toda variable que tiene influencia sobre la variable controlada pero no puede ser modificada directamente por la variable manipulada. Por ejemplo, la temperatura de entrada de agua en un intercambiador de calor. El sistema tiene que esperar a que el cambio en la temperatura del agua alcance la salida del proceso, donde se encuentra situada la variable controlada, para que ésta realice la acción correspondiente sobre la variable manipulada.

En la actualidad y gracias al avance de la tecnología, se han desarrollado sistemas de control digitales con los cuales se logra un funcionamiento óptimo de los procesos industriales. (Sánchez, 2003)

2.2.1. Elementos en un sistema de control

En todo sistema de control aparecen claramente diferenciados una serie de elementos característicos al mismo que es necesario clarificar:

- **Variable por controlar.** Generalmente se le conoce como señal de salida. Constituye la señal que deseamos que adquiera unos valores determinados. En el ejemplo anteriormente descrito la señal de salida o variable a controlar sería la temperatura ambiente de la vivienda o de una habitación determinada.
- **Planta o Sistema.** La planta o sistema constituye el conjunto de elementos que realizan una determinada función. En el ejemplo propuesto la planta o sistema lo constituiría toda la vivienda en su conjunto. El sistema estaría determinado por las relaciones de transmisión de calor en la misma con las aportaciones y fugas que presentase en función de sus características.
- **Sensor.** El sensor es el elemento que permite captar el valor de la variable a controlar en determinados instantes de tiempo. En el caso propuesto consistiría en el elemento que permitiría conocer la temperatura de la vivienda en determinados momentos.
- **Señal de referencia.** Es la señal consigna o valor que deseamos que adquiera la señal de salida (objetivo de control). En el ejemplo indicaría la temperatura que deseamos que tenga la vivienda a lo largo de toda la jornada.

- **Actuador.** El actuador es el elemento que actúa sobre el sistema modificando de esta forma la señal de salida. En el caso de un sistema de calefacción consistiría en la caldera que permite aportar mayor o menor cantidad de calor sobre el sistema o planta (vivienda) a regular.
- **Controlador.** El controlador o regulador es el elemento que comanda al actuador en función del objetivo de control. En el ejemplo planteado anteriormente, el regulador tendría como misión decidir cuál debe ser la aportación de la caldera en todo instante para mantener el objetivo de control (temperatura de la vivienda). (García, Reinoso García, García Aracil, & Aracil Santonja, 2003)

2.2.2. Sistema de Control de Lazo Abierto

Un sistema de control en lazo abierto es aquel en el que la señal de salida no influye sobre la acción de control. De esta forma el controlador o regulador no tiene en cuenta el valor de la señal de salida, ni se compara ésta con la señal de referencia para decidir la actuación en todo instante sobre el sistema. El caso más típico de un sistema de control en lazo abierto lo constituye la lavadora eléctrica donde el sistema de control va modificando el tiempo, la temperatura de lavado, etc. en función de la indicación del usuario y no en función del nivel de lavado de la ropa (que constituiría el objetivo de control). De esta forma el usuario decide el programa que desea realizar (señal de referencia), y el controlador actúa sobre los diferentes mecanismos del sistema (lavadora) de forma que realiza una serie de actuaciones sin tener en cuenta la señal de salida. En la figura 1 se pueden observar las señales involucradas en un control en lazo abierto.

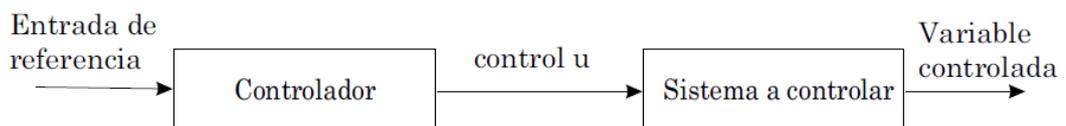


Figura 1: Sistema de Control de lazo abierto.

Evidentemente los sistemas de control en bucle abierto funcionarían razonablemente bien siempre y cuando hayan sido perfectamente estudiados y no exista ninguna alteración sobre el sistema. Si el fabricante ha estudiado perfectamente cuál debe ser el proceso de lavado para la ropa de unas características determinadas y no se altera en modo alguno el proceso, el objetivo final quedará perfectamente alcanzado. Sin embargo, en el momento en que se altere alguna de las características del proceso (cantidad de ropa, temperatura del agua, suciedad de la ropa, etc.) por cualquier motivo, el objetivo de control puede no satisfacerse. (García, Reinoso García, García Aracil, & Aracil Santonja, 2003)

2.2.3. Sistema de Control de Lazo Cerrado

En los sistemas de control en bucle cerrado existe una realimentación de la señal de salida o variable a controlar. En este tipo de sistemas se compara la variable a controlar con la señal de referencia de forma que en función de esta diferencia entre una y otra, el controlador modifica la acción de control sobre los actuadores de la planta o sistema. En la figura 2 aparece representado un esquema típico de un sistema controlado en lazo cerrado.

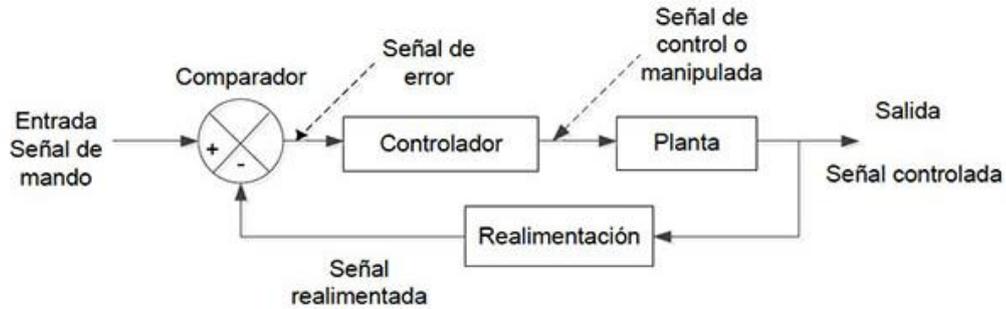


Figura 2: Sistema de control en lazo cerrado.

En el sistema de control en bucle cerrado ya no afecta tanto las variaciones en cada una de las características del proceso (cantidad de ropa, temperatura, etc.) ya que el controlador debe actuar en todo instante en función de la diferencia entre la señal a controlar (limpieza de la ropa) y la señal de referencia (por ejemplo, blancura deseada).

Es necesario comentar que si se conociese perfectamente un sistema y no pudiese alterarse de ninguna forma las características del mismo (tanto internas como externas), es más aconsejable utilizar un sistema de control en lazo abierto pues serían más sencillos y económicos. Los sistemas de control en lazo cerrado presentan ventajas cuando se pueden producir perturbaciones sobre el sistema o bien variaciones impredecibles en alguna de las características del mismo. (García, Reinoso García, García Aracil, & Aracil Santonja, 2003)

2.3. Módulos didácticos para el control de procesos industriales

Un módulo didáctico para el control de procesos industriales es una planta de proceso a escala reducida. El fin que se persigue al diseñar, construir y operar una planta piloto para obtener información sobre un determinado proceso, que permita determinar si este es técnica y económicamente viable, así como establecer los parámetros de operación óptimos de dicho proceso para el posterior diseño y construcción de la planta a escala industrial.

Un módulo didáctico debe ser mucho más flexible que una planta a escala industrial en cuanto al rango permisible de sus parámetros de operación o variables de proceso, ya que una planta industrial opera siempre en las mismas condiciones, mientras que una planta piloto, por el hecho de estar destinada a la investigación o estudio de un proceso, debe permitir trabajar en

un amplio rango de valores de temperatura, presión, etc., de manera que puedan realizarse experimentos o ensayos con valores distintos de las variables de proceso y poder determinar así los valores óptimos.

Los módulos didácticos pueden combinarse y agregar nuevas variables a medir, ya que pueden emular un proceso industrial el cual involucra diferentes sistemas dependiendo del proceso.

El desarrollo de un módulo didáctico está relacionado con una propuesta de enseñanza orientada al desarrollo de competencias. Donde competencia se puede definir como la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, permitiendo movilizar (poner a disposición) distintos saberes en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales.

2.3.1. Tipos de módulos didácticos de control

Un módulo didáctico permite el estudio del control de procesos continuos, soliendo ser las variables típicas por medir: presión, temperatura, humedad, flujo, nivel, etc. El módulo es fabricado con componentes industriales y comerciales reales, fácilmente identificados por los estudiantes y comúnmente utilizados en plantas industriales.

Las principales áreas que se tratan de refinar mediante la experimentación son relativas a producto, materias primas, reacciones, separación y sistemas auxiliares.



Figura 3: Ejemplo de un Módulo Didáctico de Control.

2.3.1.1. Módulo didáctico para el control de presión

Dentro de los procesos industriales la medición y el control de la variable presión se hacen indispensables para lograr obtener una producción continua y contar con condiciones de operación seguras. Cualquier recipiente o tubería tiene una presión máxima de operación y sobrepasarla puede ocasionar la destrucción no solo del mismo equipo sino también la del adyacente y poner al personal en una situación de riesgo, principalmente cuando están implícitos fluidos inflamables o corrosivos. Para tales aplicaciones, el control y la medición con gran precisión para la variable presión son tan importantes como la seguridad extrema.

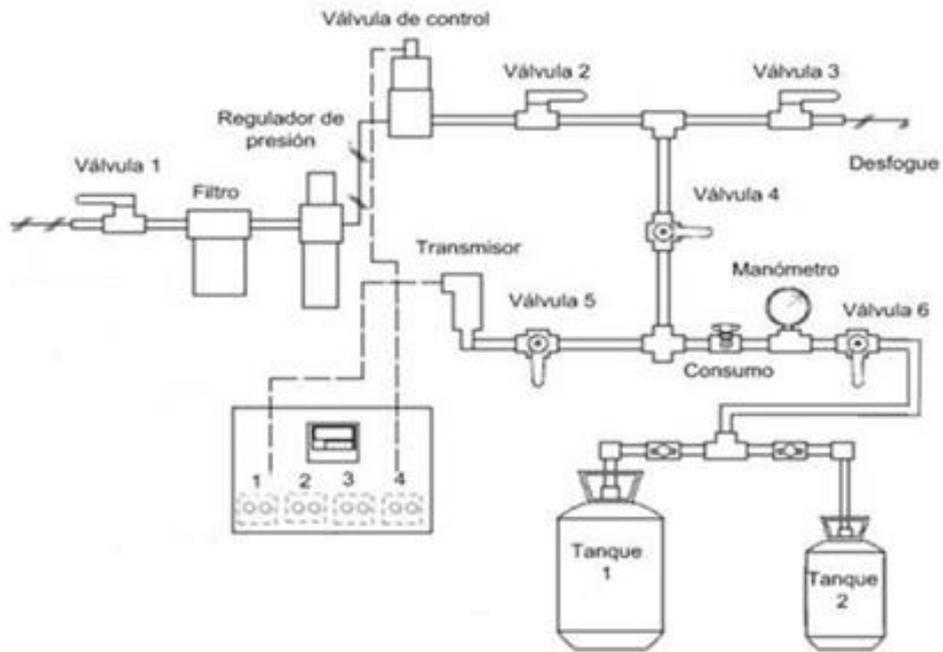


Figura 4: Diagrama Módulo Control de presión.

2.3.1.2. Módulo didáctico para el control de temperatura

Una La temperatura es una de las principales variables que afectan el curso de los procesos químicos, por tal razón esta variable debe ser medida con la mayor exactitud posible para poder controlarla adecuadamente.

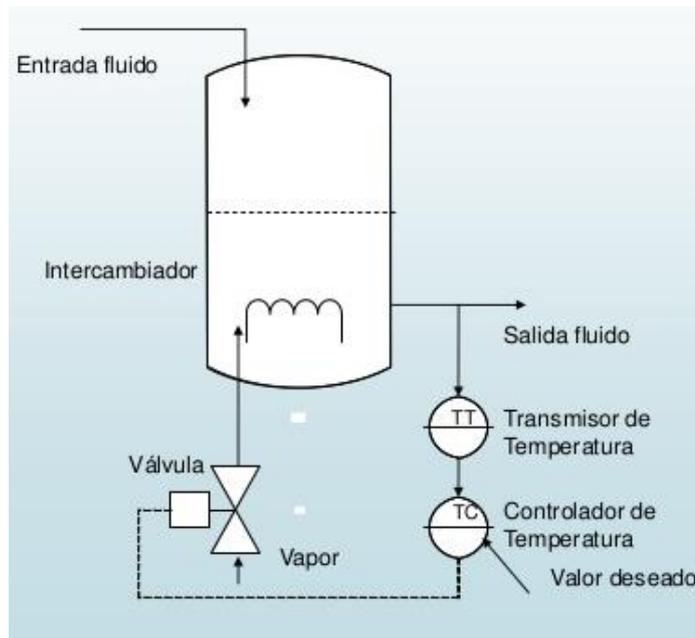


Figura 5: Diagrama Control de Temperatura en un intercambiador de calor.

2.3.1.3. Módulo didáctico para el control de nivel

La medida del nivel de un líquido en un recipiente puede servir para conocer la cantidad de líquido que contiene, así como también como punto de partida de un sistema de control automático adecuado para mantener constante un nivel en un recipiente que haga parte de un proceso continuo.

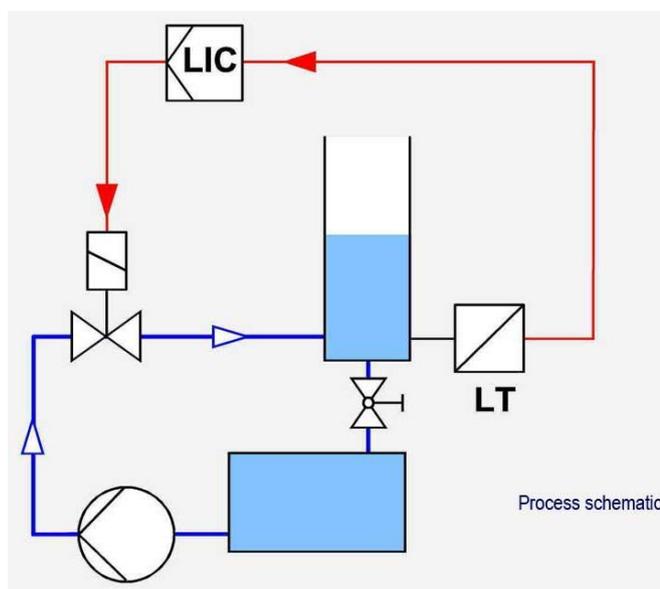


Figura 6: Diagrama Módulo de Control de Nivel de líquido.

2.3.2. Finalidad de un módulo didáctico de control

La función principal de un módulo didáctico es permitir que los estudiantes puedan controlar variables industriales a través de la experimentación y la práctica. Además, permite llevar a cabo la investigación de parámetros que muestren la información sobre la aplicabilidad de este sistema a nivel industrial.

Una vez que se haya concluido el trabajo experimental en el módulo didáctico, se desprenderá la siguiente información:

- El diagrama de bloques del proceso.
- Reconocimiento de las variables de proceso y como pueden afectar al mismo.
- Reconocimiento de las variables de perturbación y sus efectos sobre el proceso.
- Determinación del tipo de control que se debe aplicar al proceso.
- Los materiales de construcción más adecuados para la planta.
- Los costos estimados de construcción y operación de la planta.

2.4. Controladores Lógicos Programables

El controlador lógico programable es un equipo electrónico que se usa frecuentemente en el manejo de procesos industriales.

Fueron introducidos en los años 60 para reemplazar las antiguas lógicas cableadas o lógicas de relé, que eran controles hechos con diferentes tipos de relé (como relé de uso general o temporizadores), de hecho la primeras instrucciones diseñadas para el controlador lógico programable emulaban las funciones de los relés y eran dispuestos en un lenguaje gráfico llamado escalera por su similitud con una escalera como las usadas por los bomberos, muy similar a los diagramas o planos de la lógica de relé.

Los controladores lógicos programables han ido evolucionando con la tecnología, ahora tienen un conjunto de instrucciones que incluyen funciones lógicas, aritméticas, de comparación, manejo de archivos, flujo de programas y lazos PID entre otros. (Miguel, 2015)

2.4.1. Clases de PLC

2.4.1.1. PLC Compacto

Son aquellos PLCs que utilizan poco espacio en su construcción y reúnen en la estructura básica del hardware todas las tarjetas electrónicas que describimos anteriormente, tal como la fuente de alimentación, la CPU, la memoria y las interfaces de E/S.

Las principales ventajas que presentan estos PLC compactos, denominados así por su tamaño, son:

- Más económicos dentro de su variedad.
- Menor espacio por su construcción compacta.
- Su programación es bastante sencilla.
- No requiere conocimientos profundos para su selección.
- Fácil instalación.
- Soportan contingencias extremas de funcionamiento tales como, temperaturas $<60^{\circ}\text{C}$, fluctuaciones de tensión, vibraciones mecánicas, humedad, etc. (Villajulca, 2012)



Figura 7: PLC compacto S7-1200.

2.4.1.2. PLC Modular

Son aquellos PLCs que pueden ser configurados (armados) de acuerdo con las necesidades, para “armar” al PLC utilizamos las tarjetas (o módulos) electrónicos estudiados anteriormente, logrando mayor flexibilidad.

Cada configuración es diferente, según la tarea de automatización. Cuando se decide instalar PLC modulares, hay que seleccionar cada uno de los componentes, empezando, en primer lugar, por el cerebro del PLC, esto es, la unidad central (CPU), ellos varían de acuerdo con la capacidad de memoria del usuario, tiempo de ejecución y software requerido, en otras palabras, de acuerdo con la complejidad de la tarea o tareas de automatización.

En segundo lugar, hay que tener presente el tipo y cantidad de módulos de Entrada/Salida (E/S) digitales y análogas, módulos inteligentes, etc., de acuerdo con los requerimientos.

En tercer lugar, la fuente de alimentación, según la potencia que consume la CPU, módulos de E/S, periféricos, más módulos futuros.

Y finalmente, el tamaño del rack, conociendo de antemano todos los módulos involucrados y pensando también en expansiones futuras. (Villajulca, 2012)



Figura 8: PLC Modular Allen Bradley.

2.4.1.3. PLC Compacto- Modular

Una configuración compacto-modular está constituida, básicamente, por un PLC del tipo compacto, que se ha expandido a través de otros módulos, por lo general, entradas y salidas discretas o analógicas, módulos inteligentes, etc. El uso de las expansiones se debe a que la unidad básica que contiene la CPU generalmente está diseñada con pocas E/S, y cuando la aplicación a automatizar contiene muchos sensores y actuadores, es necesario ampliar el controlador, utilizando solamente módulos de E/S gobernados por la misma unidad básica. Esta configuración destaca por las siguientes características:

- Son más económicos que los PLC de tipo modular.
- La selección es sencilla ya que la CPU está seleccionada.
- Soportan contingencias extremas de funcionamiento.
- Su programación es fácil, donde solamente se debe tener en cuenta el direccionamiento de las instrucciones, según la unidad de extensión a la que se refiere. (Villajulca, 2012)



Figura 9: PLC Compacto – Modular.

2.5. Instrumentos Industriales

2.5.1. Sensores

2.5.1.1. Sensores de Presión

El sensor de presión más común es el tubo de Bourdon, desarrollado por el ingeniero francés Eugene Bourdon, y el cual se ilustra en la figura 9; consiste básicamente en un tramo de tubo en forma de herradura, con un extremo sellado y el otro conectado a la fuente de presión. Debido a que la sección transversal del tubo es elíptica o plana, al aplicar una presión el tubo tiende a enderezarse, y al quitarla, el tubo retorna a su forma original, siempre y cuando no se rebase el límite de elasticidad del material del tubo. La cantidad de enderezamiento que sufre el tubo es proporcional a la presión que se aplica, y como el extremo abierto del tubo esta fijo, entonces el extremo cerrado se puede conectar a un indicador, para señalar la presión; o a un transmisor, para generar una señal neumática o eléctrica.

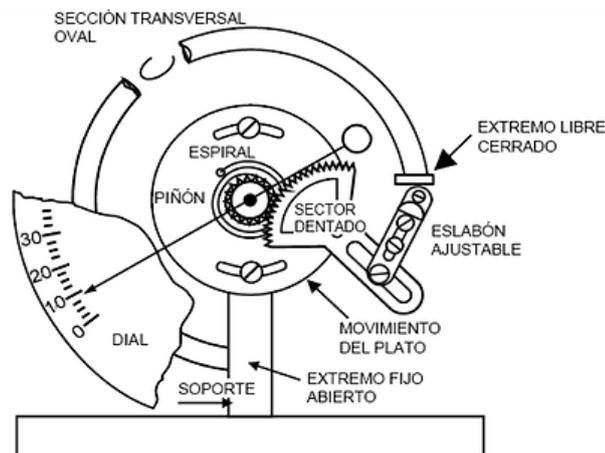


Figura 10: Tubo de Bourdon sencillo.

El rango de presión que se puede medir con el tubo de Bourdon depende del espesor de las paredes y del material con que se fabrica el tubo. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

2.5.1.2. Sensores de Flujo

El flujo es una de las dos variables de proceso que se miden más frecuentemente, la otra es la temperatura; en consecuencia, se han desarrollado muchos tipos de sensores de flujo.

Probablemente el sensor de flujo más popular es el medidor de orificio, que es un disco plano con un agujero. El disco se inserta en la línea de proceso, perpendicular al movimiento del fluido, con objeto de producir una caída de presión, la cual es proporcional a la razón de flujo volumétrico a través del orificio.

Otro tipo común de sensor es el medidor magnético de flujo que se ilustra en la figura 10. El principio de operación de este elemento es la ley de Faraday; es decir, cuando un material conductor (un fluido) se mueve en ángulo recto a través de un campo magnético, se induce un voltaje, el cual es proporcional a la intensidad del campo magnético y a la velocidad del fluido. Si la intensidad del campo magnético es constante, entonces el voltaje únicamente es proporcional a la velocidad del fluido; además, la velocidad que se mide es la velocidad promedio y, por lo tanto, este sensor se puede utilizar para los dos regímenes: laminar y turbulento. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

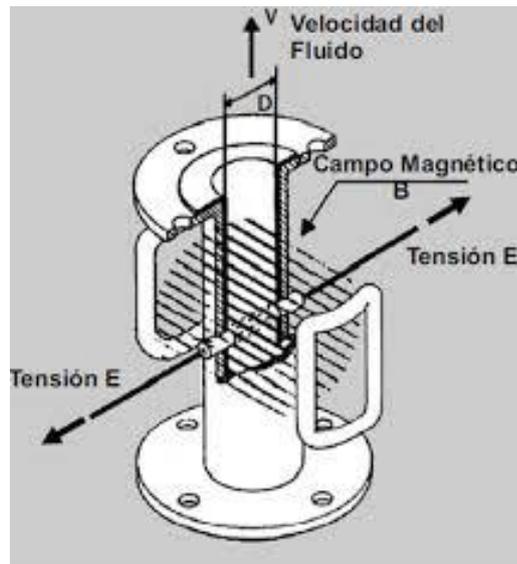


Figura 11: Medidor magnético de flujo.

Otro medidor de flujo importante es el medidor de turbina que se ilustra en la figura 11. Es uno de los más precisos de que se dispone comercialmente. Su principio de funcionamiento se basa en un rotor que se hace girar con el flujo del líquido; la

rotación de las aspas se detecta mediante una bobina de colección magnética, la cual emite pulsos a una frecuencia que es proporcional a la razón de flujo volumétrico; este pulso se convierte en una señal equivalente de 4-20 mA, de manera que se pueda utilizar con instrumentación electrónica estándar, el convertidor o transductor es generalmente parte integral del medidor. Uno de los problemas que más comúnmente se asocia con los medidores de turbina es el de los cojinetes (rodamientos), por lo que se requiere que los líquidos sean limpios y con algunas propiedades lubricantes. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

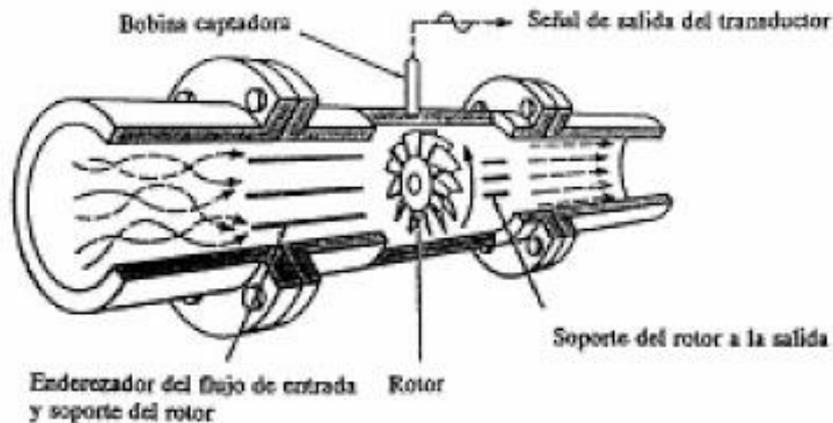


Figura 12: Medidor de flujo de turbina.

2.5.1.3. Sensores de Nivel

Los tres medidores de nivel más importantes son el de diferencial de presión, el de flotador y el de burbujeo. El método de diferencial de presión consiste en detectar la diferencia de presión entre la presión en el fondo del líquido y en la parte superior del líquido, la cual es ocasionada por el peso que origina el nivel del líquido. Este sensor se ilustra en la figura 12. El extremo con que se detecta la presión en el fondo del líquido se conoce como extremo de alta presión, y el que se utiliza para detectar la presión en la parte superior del líquido, como extremo de baja presión. Una vez que se conoce el diferencial de presión y la densidad del líquido, se puede obtener el nivel.

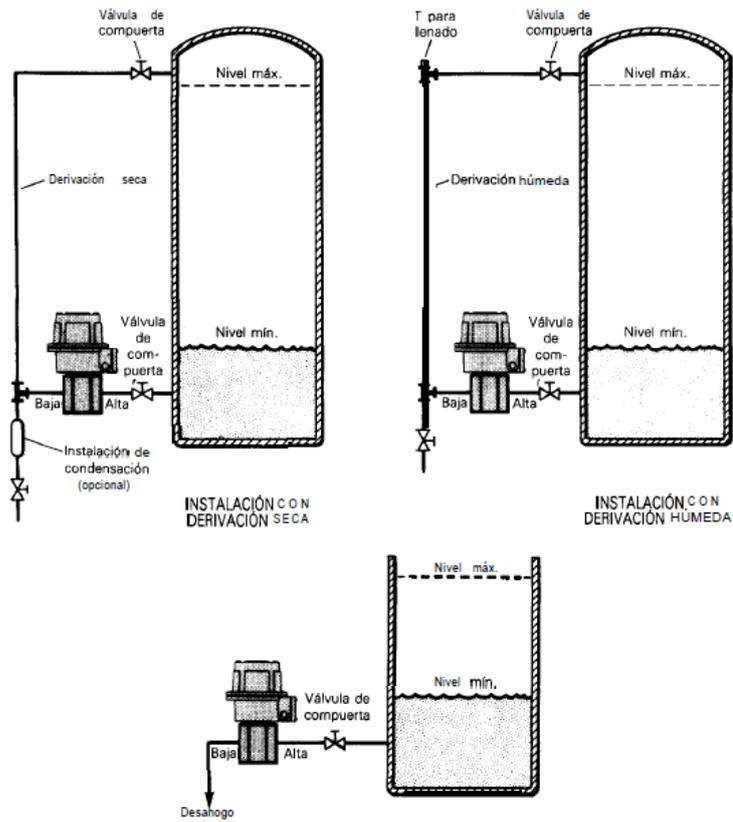


Figura 13: Instalación de transmisores de diferencial de presión en recipientes abiertos y cerrados.

Con el Sensor de flotador se detecta el cambio en la fuerza de empuje sobre un cuerpo sumergido en el líquido. Este sensor se instala generalmente en un ensamble que se monta de manera externa al recipiente, como se muestra en la figura 13. La fuerza que se requiere para mantener al flotador en su lugar es proporcional al nivel del líquido y se convierte en una señal en el transmisor.

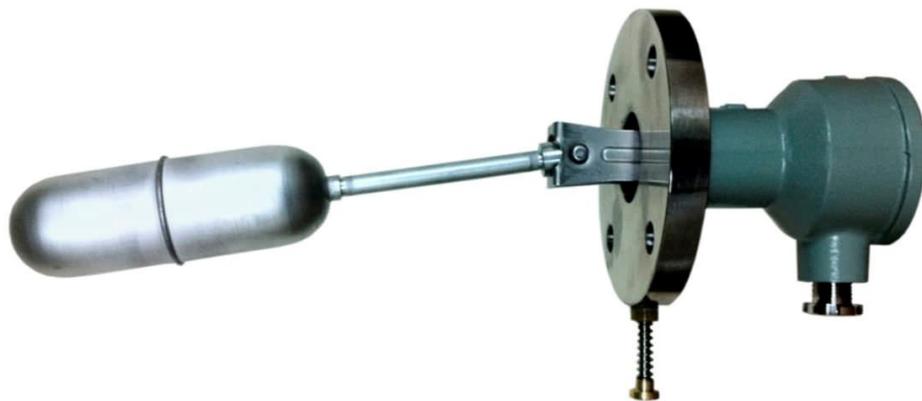


Figura 14: Sensor de nivel con flotador.

El sensor de burbujeo es otro tipo de sensor de presión hidrostática, y consiste, como se muestra en la figura 14, en un tubo con gas inerte que se sumerge en el líquido; el aire o gas inerte que fluye a través del tubo se regula para producir una corriente continua de burbujas, y la presión que se requiere para producir esta corriente continua es una medida de la presión hidrostática o nivel del líquido.

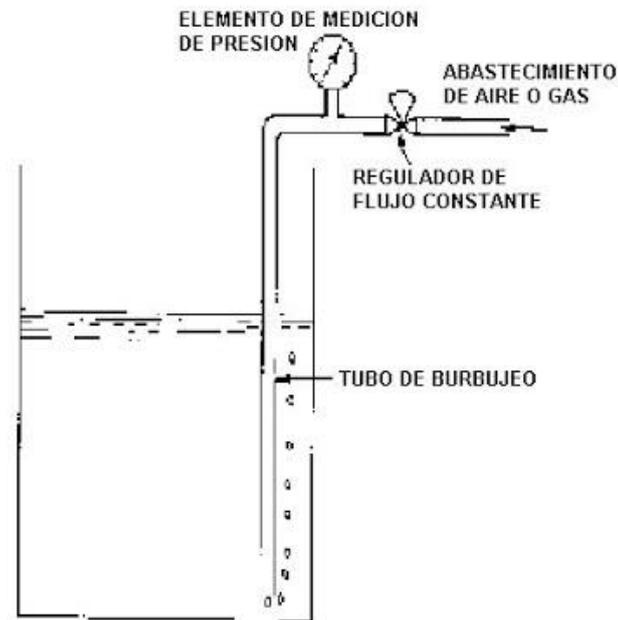


Figura 15: Sensor de nivel de burbujas de aire.

Existen otros métodos nuevos para medir el nivel en los tanques, algunos de éstos son patrones de capacitancia, sistemas ultrasónicos y sistemas de radiación nuclear; los dos últimos sensores también se utilizan para medir el nivel en materiales sólidos. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

2.5.1.4. Sensores de Temperatura

La temperatura, junto con el flujo, es la variable que con mayor frecuencia se mide en la industria de proceso; una razón simple es que casi todos los fenómenos físicos se ven afectados por esta. La temperatura se utiliza frecuentemente para inferir otras variables del proceso.

Los termómetros de dispositivos resistivos (TDR) son elementos que se basan en el principio de que la resistencia eléctrica de los metales puros se incrementa con la temperatura y, ya que la resistencia eléctrica se puede medir con bastante precisión, esto proporciona un medio para medir la temperatura con mucha exactitud. Los metales que se utilizan más comúnmente son platino, níquel, tungsteno y cobre. En la figura 15 se muestra el esquema de un TDR típico.

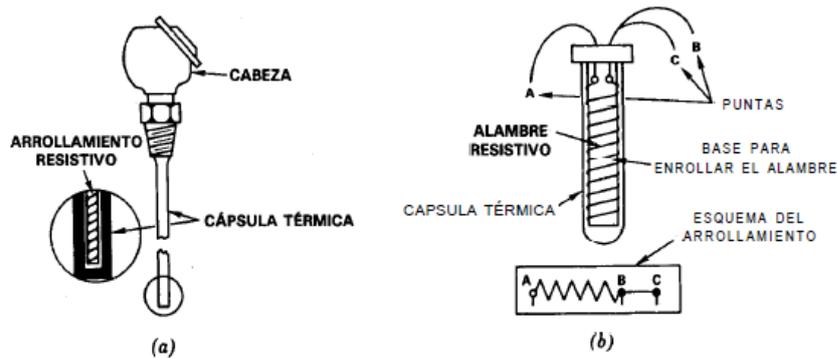


Figura 16: Esquema de un termómetro de resistencia. a) Ensamblaje, b) componentes.

Para la lectura de la resistencia y, en consecuencia, también para la de temperatura generalmente se utiliza un puente de Wheatstone. En la figura 16 se ilustra el sistema de los puentes de dos y tres hilos que se utilizan.

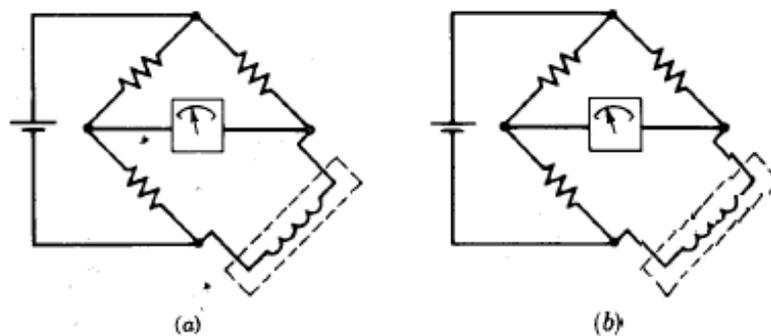


Figura 17: Puente de Wheatstone de dos hilos y de tres hilos.

Con los elementos termistores se detectan cambios muy leves de temperatura. Los termistores se fabrican con la combinación sinterizada de material cerámico y alguna clase de óxido metálico semiconductor, como níquel, manganeso, cobre, titanio o hierro.

En los termistores se tiene un coeficiente de resistividad térmica muy negativo, o algunas veces positivo. En la figura 17 se ilustran algunos termistores típicos. Los puentes de Wheatstone de la figura 16 se utilizan generalmente para medir la resistencia y, por lo tanto, también la temperatura. Algunas de las ventajas son el tamaño pequeño y el bajo costo; sus principales desventajas estriban en que la relación de la temperatura contra la resistencia no es lineal, así como el hecho de que generalmente se requieren líneas de fuerza blindadas. (Carlos A. Smith & Armando B. Corripio, 1991)

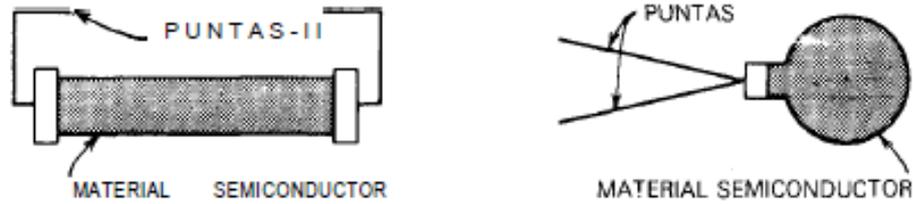


Figura 18: Construcción de un termistor típico.

2.5.2. Actuadores

Un actuador es un dispositivo inherentemente mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o “actuar” otro dispositivo mecánico. La fuerza que provoca el actuador proviene de tres fuentes posibles: Presión neumática, presión hidráulica, y fuerza motriz eléctrica (motor eléctrico o solenoide). Dependiendo de el origen de la fuerza el actuador se denomina “neumático”, “hidráulico” o “eléctrico”. (C.)

2.5.2.1. Válvulas de Control

Existen muchos tipos diferentes de válvulas de control en el mercado, casi cada mes se ofrece una “nueva” válvula de control “mejorada”.

2.5.2.1.1. De Vástago Reciproco

Conocidas también como válvulas de globo con asiento sencillo y vástago deslizable. Son una familia de válvulas que se caracterizan por una parte de cierre que viaja en línea perpendicular al asiento de la válvula, y se utilizan principalmente para propósitos de estrangulamiento y control de flujo en general.

Existen también las válvulas de tres vías que son de tipo reciproco. Las válvulas de tres vías pueden ser convergentes o divergentes y, en consecuencia, con ellas se pueden separar una corriente en dos o se pueden mezclar dos corrientes en una sola. Comúnmente se utilizan para propósito de control. (Andrew, 2002)

2.5.2.1.2. De Vástago Rotatorio

Una de las más comunes es la válvula de mariposa, estas válvulas constan de un disco que gira alrededor de un eje; se requiere mínimo espacio para su instalación y se tiene alta capacidad de flujo con caída de presión mínima; se utilizan en servicios de baja presión. Con los discos convencionales se logra controlar el estrangulamiento hasta en 60 grados de giro, pero con discos de nueva patente se puede controlar el estrangulamiento para un giro completo de 90 grados.

Otra válvula común de vástago rotatorio es la válvula de esfera, con ellas también se logra una alta capacidad de control de flujo con caída mínima de presión, se utilizan comúnmente para manejar suspensiones o materiales fibrosos; la tendencia a escurrimiento es baja y su tamaño es pequeño. (Andrew, 2002)

2.5.2.2. Motores

Entre los motores de corriente alterna que más se emplean en la industria tenemos a los motores asíncronos, y entre estos tenemos los de rotor en cortocircuito o de jaula de ardilla, estos son los más utilizados.

Estos motores se diseñan y se construyen de tal forma que, sus bobinados, en carga nominal, resistan unos calentamientos compatibles con una larga vida de sus aislantes. Es preciso recordar que un motor se calienta por efecto de sus pérdidas en el cobre, proporcionales al cuadrado de la intensidad, y de sus pérdidas en el hierro, constantes para una tensión dada. (Andrew, 2002)

2.6. HMI

2.6.1. Definición

Una interfaz de máquina humana (HMI) es una interfaz que permite la interacción entre un ser humano y una máquina. Las interfaces humanas de la máquina varían ampliamente, desde paneles de control para plantas de energía nuclear hasta la pantalla y botones de entrada en un teléfono celular. Diseñar tales interfaces es un desafío y requiere mucho trabajo para que la interfaz sea funcional, accesible, agradable de usar y lógica. Algunos ingenieros se especializan en el desarrollo de interfaces hombre-máquina y en cambiar las formas en que las personas interactúan con máquinas y sistemas.

Se necesitan dos componentes en una interfaz de máquina humana. El primero es una entrada. Un usuario humano necesita alguna manera de decirle a la máquina qué hacer, hacer solicitudes de la máquina o ajustar la máquina.

La interfaz también requiere una salida, que permite a la máquina mantener al usuario humano actualizado sobre el progreso de los comandos, o ejecutar comandos en el espacio físico. En una computadora, por ejemplo, los usuarios tienen una pantalla que puede mostrar información. Un robot, por otro lado, puede moverse en respuesta a comandos y almacenar datos en un disco duro para que las personas puedan ver cómo el robot responde, aprende y navega por el mundo. Las salidas también pueden incluir cosas tan simples como luces de estado que alertan a las personas cuando se activan los interruptores o interruptores. (WisGEEK community, s.f.)

2.6.2. Tipos

Interfaz de manipulación directa es el nombre de una clase general de interfaces de usuario, que permiten a los usuarios manipular los objetos que se les presenten, con las acciones que correspondan al menos vagamente con el mundo físico. Los siguientes tipos de interfaz de usuario son los más comunes:

- Las interfaces gráficas de usuario (GUI) aceptan la entrada a través de un dispositivo como el teclado de la computadora y el ratón, y proporcionar una salida gráfica en la pantalla del ordenador. Hay por lo menos dos principios diferentes utilizados en el diseño de interfaz gráfica de usuario: Interfaces de usuario orientada a objetos (OOUIs) e Interfaces orientadas a aplicaciones
- Interfaces basadas en Web de usuario o interfaces de usuario web (IUF), son una subclase de interfaces gráficas de usuario que aceptan una entrada y proporcionar una salida mediante las páginas web que se transmiten a través de internet y vistos por el usuario mediante un navegador web.
- Las pantallas táctiles son dispositivos que aceptan una entrada a través del tacto de los dedos o un lápiz. Se utiliza en una amplia cantidad de dispositivos móviles y muchos tipos de punto de venta, procesos industriales y máquinas, máquinas de autoservicio, etc.
- Las interfaces de línea de comandos, donde el usuario proporciona la entrada al escribir una cadena de comando con el teclado del ordenador y el sistema proporcionan una salida de impresión de texto en la pantalla del ordenador. Utilizado por los programadores y administradores de sistemas, en los ambientes científicos y de ingeniería, y por los usuarios de computadoras personales de tecnología avanzada.
- Las interfaces de voz del usuario, que acepta la entrada y proporcionar una salida mediante la generación de mensajes de voz. La entrada del usuario se realiza pulsando las teclas o botones, o responder verbalmente a la interfaz.
- Multi-pantalla de interfaces, el empleo de múltiples pantallas para proporcionar una interacción más flexible. Esto se emplea a menudo en la interacción de juegos de ordenador, tanto en las galerías comerciales y, más recientemente, etc. (Laura Vanessa Arenas Montaña, Arturo José Castilla De Cuba, & Danilo Alfonso Rojas Méndez)

2.7. Función de Transferencia

La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la

salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación) bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero.

Considérese el sistema lineal e invariante en el tiempo descrito mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$\begin{aligned} a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y \\ = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x \quad (n \geq m) \end{aligned}$$

Donde “y” es la salida del sistema y “x” es la entrada. La función de transferencia de este sistema es el cociente de la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada cuando todas las condiciones iniciales son cero, o

$$\begin{aligned} \text{Función de transferencia} = G(s) &= \frac{\mathcal{L}[\text{salida}]}{\mathcal{L}[\text{entrada}] \Big|_{\text{condiciones iniciales cero}}} \\ &= \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \end{aligned}$$

A partir del concepto de función de transferencia, es posible representar la dinámica de un sistema mediante ecuaciones algebraicas en s. Si la potencia más alta de s en el denominador de la función de transferencia es igual a n, el sistema se denomina sistema de orden n-ésimo.

La aplicación del concepto de función de transferencia está limitada a los sistemas descritos mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo; sin embargo, el enfoque de la función de transferencia se usa extensamente en el análisis y diseño de dichos sistemas. A continuación, se presentan algunos comentarios importantes relacionados con la función de transferencia.

- La función de transferencia de un sistema es un modelo matemático porque es un método operacional para expresar la ecuación diferencial que relaciona la variable de salida con la variable de entrada.
- La función de transferencia es una propiedad de un sistema, independiente de la magnitud y naturaleza de la entrada o función de excitación.
- La función de transferencia incluye las unidades necesarias para relacionar la entrada con la salida; sin embargo, no proporciona información acerca de la estructura física del sistema. (Las funciones de transferencia de muchos sistemas físicamente diferentes pueden ser idénticas.)

- Si se conoce la función de transferencia de un sistema, se estudia la salida o respuesta para varias formas de entrada, con la intención de comprender la naturaleza del sistema.
- Si se desconoce la función de transferencia de un sistema, puede establecerse experimentalmente introduciendo entradas conocidas y estudiando la salida del sistema. Una vez establecida una función de transferencia, proporciona una descripción completa de las características dinámicas del sistema, a diferencia de su descripción física. (Ogata, 2010)

2.7.1. Identificación paramétrica de sistemas

Antes del diseño de cualquier tipo de controlador, es necesario conocer su función de transferencia. Cuando se trata de sistemas conocidos y que son utilizados para la enseñanza del control automático, las funciones de transferencia de dichos sistemas están siempre disponibles. Por el contrario, cuando se desea realizar el diseño de un controlador para un sistema y este es un sistema físico real, por lo regular se desconoce su función de transferencia, siendo un requisito indispensable conocerla para poder diseñar el control apropiado para este. Mediante el proceso de identificación se pretende obtener un modelo matemático del proceso que se comporte de una manera lo más aproximada posible al sistema real. Sin embargo, si se conocen experimentalmente en un momento dado, la excitación aplicada al sistema y el curso temporal de la respuesta a esa excitación es posible asociar un modelo al sistema y es posible también determinar la relación entre variables y parámetros del sistema que correspondan al modelo que se le ha asociado a dicho sistema. Al proceso de estructurar un modelo para un sistema y de determinar cuantitativamente a partir de datos experimentales, la interrelación entre las variables y parámetros del proceso recibe el nombre de “Identificación Paramétrica del Sistema”. La forma más usual de identificar a un sistema es aplicar en su entrada una excitación conocida, obtener la respuesta y después tratar de ajustar un modelo conocido a las particularidades del sistema sujeto a la identificación. Las señales más frecuentemente usadas como excitaciones al hacer una identificación son:

- Señal escalón
- Señal senoidal de amplitud constante y frecuencia variable

A la identificación hecha por medio de una función escalón se le conoce como “Identificación en tiempo”, y a la identificación hecha por medio de señales senoidales se le conoce como

“Identificación en frecuencia”; aunque en ambos casos el objetivo sea determinar la función de transferencia que mejor describa el comportamiento del sistema. Cabe destacar que en la actualidad existen algoritmos computacionales que pueden obtener la función de transferencia de un sistema real con bastante precisión.

2.7.1.1. Identificación en tiempo

Para realizar una identificación en tiempo, es necesario excitar al sistema por medio de una función escalón (de preferencia unitaria) y conocer la respuesta a esta excitación. La mejor manera de conocer la respuesta es contar con una gráfica $[c(t) \text{ vs } t]$ adecuadamente escalada, en la que sea posible observar el curso temporal de la respuesta desde el momento de aplicar la excitación hasta el establecimiento del régimen permanente en el sistema.

Una de las características atractivas del método de identificación en tiempo es el hecho de que una señal escalón siempre es fácil de generar.

Básicamente todos los procesos existentes en la naturaleza pueden clasificarse en dos tipos, sistemas de primer orden y sistemas de segundo orden (muchos de los sistemas de orden superior pueden ser aproximados por sistemas de segundo orden). Dentro de los cuales existen variantes, tal como se especificará posteriormente.

2.7.1.1.1. Respuestas sobreamortiguadas

2.7.1.1.1.1. Sistema de primer orden puro

La respuesta típica de estos sistemas no presenta sobre oscilación, esto quiere decir que nunca llegan al valor exacto de la consigna y, por lo tanto, son sistemas relativamente lentos. Esto se puede apreciar en la figura 18.

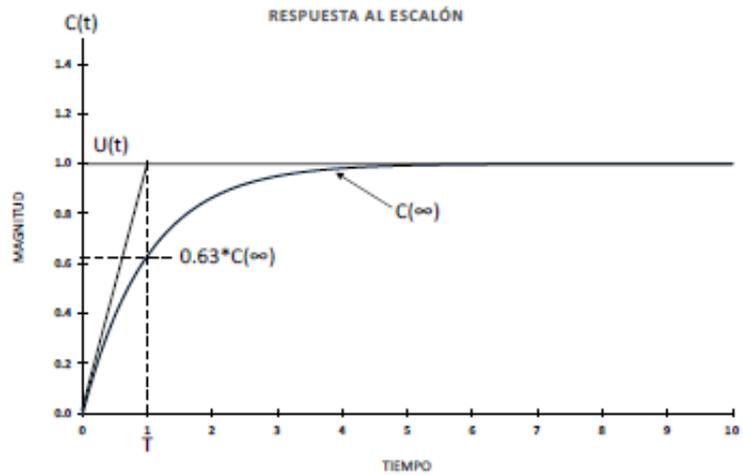


Figura 19: Respuesta del sistema de 1° orden puro.

La función de transferencia de un sistema de 1° orden es la siguiente:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

Donde K es la ganancia del sistema y T es la constante de tiempo.

El valor de la constante de tiempo se obtiene sobre la gráfica, para ello se observa el tiempo correspondiente a un valor del 63%. Normalmente se trabaja con un factor denominado tiempo de establecimiento, que suele estar comprendido entre un 95 – 98 %. Este factor determina el tiempo en el cual la respuesta se estabiliza entre los límites indicados a ese porcentaje.

2.7.1.1.2. Sistemas de primer orden con retardo

La respuesta típica de este tipo de sistemas presenta la misma configuración que un sistema de primer orden puro, en el cual la respuesta presenta un desfase o retardo respecto a la señal de entrada. Lo anterior se puede apreciar en la figura 19.

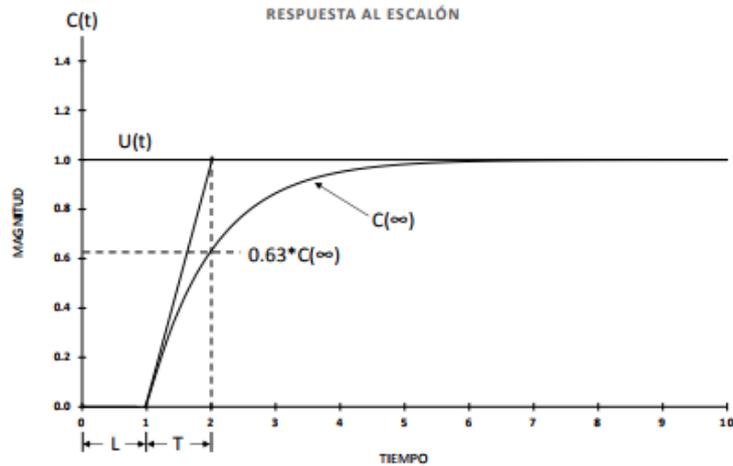


Figura 20: Respuesta del sistema de 1º orden con retardo.

La función de transferencia de un sistema de primer orden con retardo es la siguiente:

$$G(s) = \frac{K}{T s + 1} e^{-Ls}$$

Donde K es la ganancia del sistema, T es la constante de tiempo y L es el retardo.

Igual que para el caso anterior, el valor de la constante de tiempo se obtiene sobre la gráfica, para ello se observa el tiempo correspondiente a un valor del 63% de $u(t)$.

Normalmente se trabaja con un factor denominado tiempo de establecimiento, que suele estar comprendido entre un 95 – 98 %. Este factor determina el tiempo en el cual la respuesta se estabiliza entre los límites indicados a ese porcentaje.

2.7.1.1.3. Sistemas de primer orden con polos reales múltiples

La respuesta de este tipo de sistemas varía según la cantidad de polos existentes, conforme aumenta el número de polos la respuesta es más lenta, teniendo al inicio un arranque con mayor suavidad. Esto se puede apreciar en la figura 20.

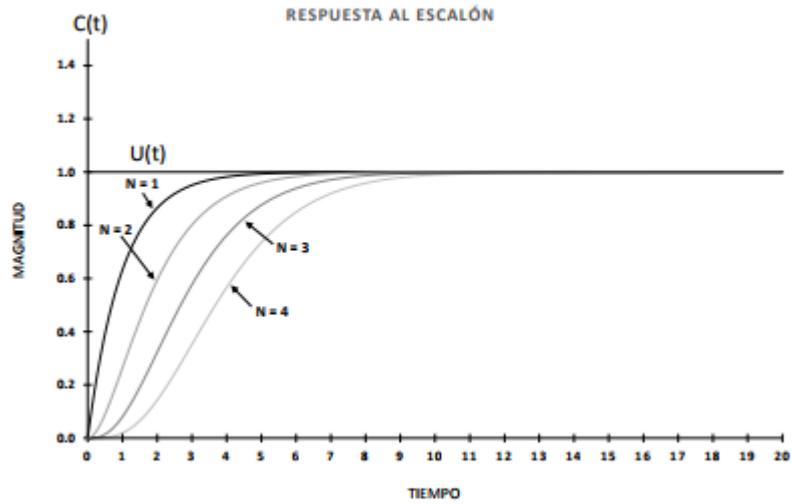


Figura 21: Respuestas de sistemas con polos reales múltiples.

La función de transferencia de un sistema de polos reales múltiples es la siguiente:

$$G(s) = \frac{K}{(Ts + 1)^n}$$

Donde K es la ganancia del sistema, T es la constante de tiempo y “n” es el número de polos del sistema.

Para obtener la función de transferencia de este tipo de sistemas se puede utilizar el “Método de Strejc”. Este método se emplea para la identificación de sistemas de polos múltiples, mediante los parámetros Tu y Ta obtenidos sobre la respuesta del sistema.

Emplea una línea recta de pendiente máxima superpuesta sobre la zona de pendiente, de modo que el valor del parámetro Tu se obtiene con el corte del eje de abscisas y el valor del parámetro Ta se obtiene con el corte de una paralela al eje de abscisas, en el punto donde la respuesta está estable. Lo anterior se muestra en la figura 21.

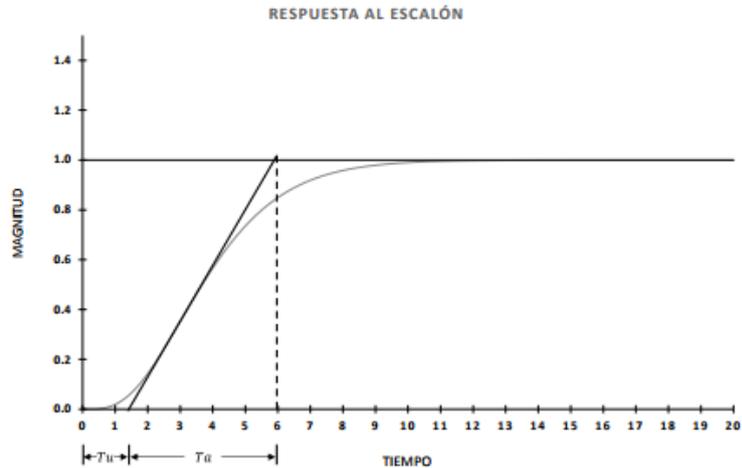


Figura 22: Parámetros de Strejc.

Tras obtener el valor de las variables T_u y T_a , se obtiene el valor de T_u/T_a . Con este valor se va a la tabla de Strejc y se toma el valor más próximo, que determina el número de polos múltiples “n”.

n	T_a/τ	T_u/τ	T_u/T_a
1	1	0	0
2	2.7	0.28	0.104
3	3.7	0.8	0.22
4	4.46	1.42	0.32
5	5.12	2.1	0.41

Figura 23: Número de polos múltiples

$$\frac{T_a}{\tau} \text{ y } \frac{T_u}{\tau}$$

Se toman los parámetros $\frac{T_a}{\tau}$ y $\frac{T_u}{\tau}$, y se despeja “tao” en cada ecuación, si los dos valores no coinciden significa que el sistema no se ajusta bien a un sistema de polos múltiples. Si por el contrario el valor obtenido es muy próximo al de la tabla se tendrá un sistema de orden “n”.

2.7.1.1.4. Sistemas de primer orden con polos reales distintos:

Si la respuesta es sobreamortiguada, y no se ajusta a ningún sistema visto hasta ahora y < 0.104 ($n = 2$), se puede ajustar con polos reales distintos. La respuesta típica de una función de transferencia de polos reales distintos se puede apreciar en la figura 23.

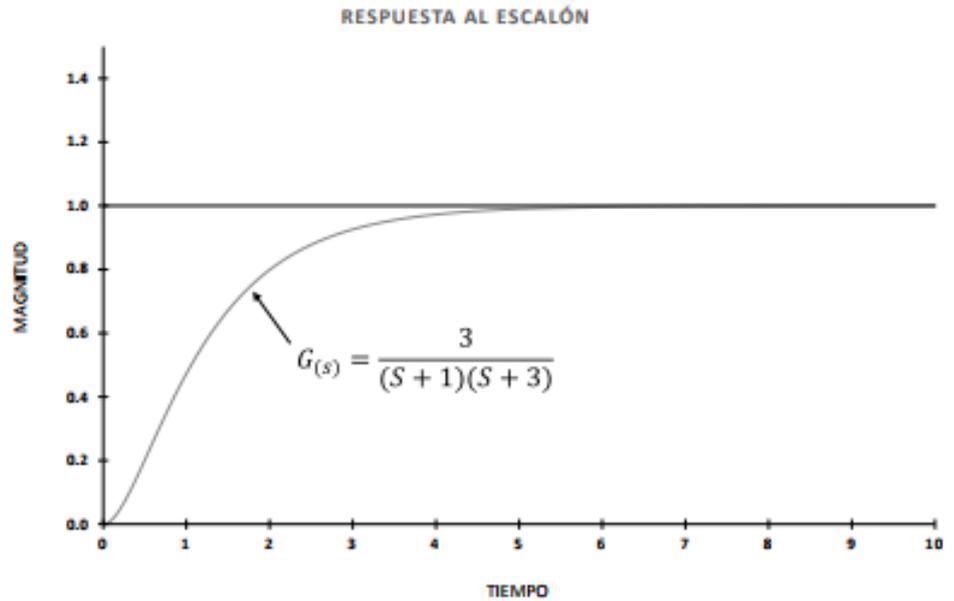


Figura 24: Respuesta de un sistema de polos distintos.

La función de transferencia de un sistema con dos polos reales diferentes es la siguiente:

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

Donde K es la ganancia del sistema, T1 y T2 son las constantes de tiempo.

Un método simple para obtener las constantes de tiempo del sistema de polos distintos es primero aplicar el método de Strejc y luego hacer ajustes en las constantes de tiempo a prueba y error, hasta obtener la respuesta lo más precisa posible.

2.7.1.1.2. Sistemas con respuesta subamortiguada

Este tipo de respuestas presentan sobre oscilación y un periodo transitorio con oscilación, y se deben a sistemas con polos complejos conjugados.

Se tienen los siguientes casos de estudio:

2.7.1.1.2.1. Sistemas estándar de segundo orden

La mayoría de los sistemas industriales se comportan como un sistema de este tipo, en el cual posteriormente el control pretende limitar parámetros como la sobre oscilación, el tiempo de establecimiento y el error en régimen permanente. La respuesta

típica de una función de transferencia de polos complejos se puede apreciar en la figura 24.

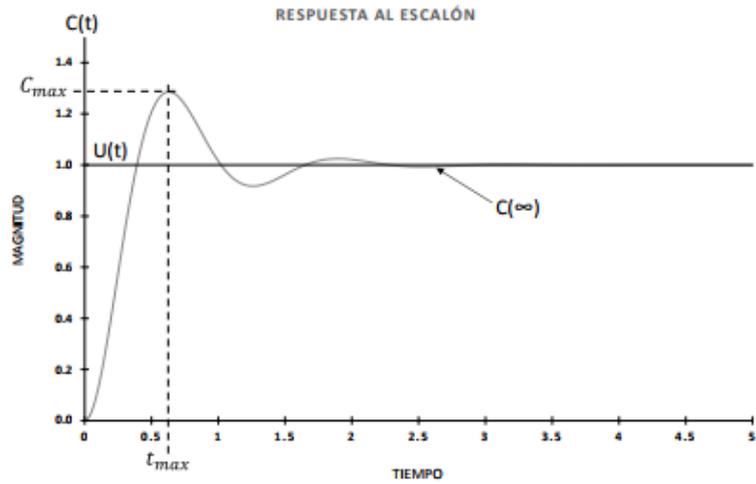


Figura 25: Respuesta de un sistema estándar de segundo orden.

La función de transferencia de un sistema estándar de segundo orden está dada por la siguiente expresión:

$$G(s) = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}$$

Donde K es la ganancia del sistema, ζ es el factor de amortiguamiento y ω_n es la frecuencia natural.

Los parámetros que describen a este tipo de respuesta son los siguientes:

$$S.P = \frac{C_{max} - C(\infty)}{C(\infty)} = e^{-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \pi}$$

Dónde:

$$\xi = \frac{|l_n(S.P)|}{\sqrt{\pi^2 + [l_n(S.P)]^2}}$$

El tiempo al cual ocurre el sobretiro máximo está dado por:

$$t_{max} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}}$$

Dónde:

$$\omega_n = \frac{\pi}{t_{max}\sqrt{1-\xi^2}}$$

2.7.1.1.2.2. Sistemas estándar de segundo orden con retardo:

La respuesta típica de una función de transferencia de polos complejos con un retardo se puede apreciar en la figura 25.

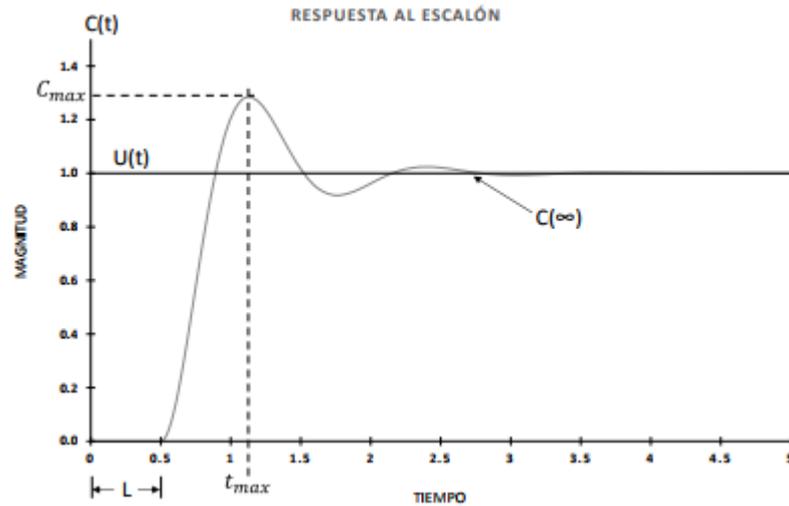


Figura 26: Respuesta de un sistema estándar de segundo orden con retardo.

La función de transferencia de un sistema estándar de segundo orden está dada por la siguiente expresión:

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} e^{-Ls}$$

Donde K es la ganancia del sistema, ζ es el factor de amortiguamiento y ω_n es la frecuencia natural.

Los parámetros que describen a este tipo de respuesta se determinan de la misma forma que para el caso del sistema estándar de segundo orden incluyendo el tiempo de retraso L, que puede ser determinado de la figura 25.

2.7.1.2. Identificación mediante la respuesta en frecuencia

Dado un sistema con función de transferencia G(s), se define la respuesta en frecuencia como la función de ω :

$$G(j\omega) = G(s)|_{s=j\omega}$$

$$u(t) = U \cdot \text{sen}(\omega t)$$

Si $x(t)$ es una señal senoidal pura de frecuencia ω , entonces $y(t)$ cuando pasa el transitorio es una señal senoidal de la misma frecuencia ω :

La representación $y(t) = U \cdot |G(j\omega)| \text{sen}(\omega t + \arg(G(j\omega)))$ diagramas de Bode contempla dos gráficas. En la primera se representa en el eje de abscisas la frecuencia en escala logarítmica la frecuencia y en el eje de ordenadas la amplitud en decibelios. En la segunda se representa en el eje de abscisas la frecuencia en escala logarítmica la frecuencia y en el eje de ordenadas el argumento o desfase en grados.

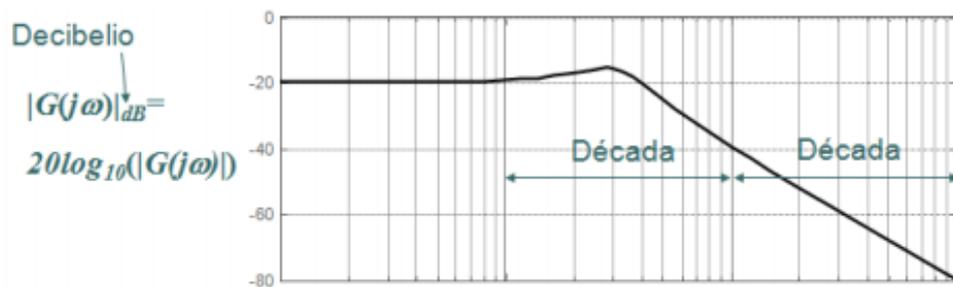


Figura 27: Representación Amplitud / Frecuencia.

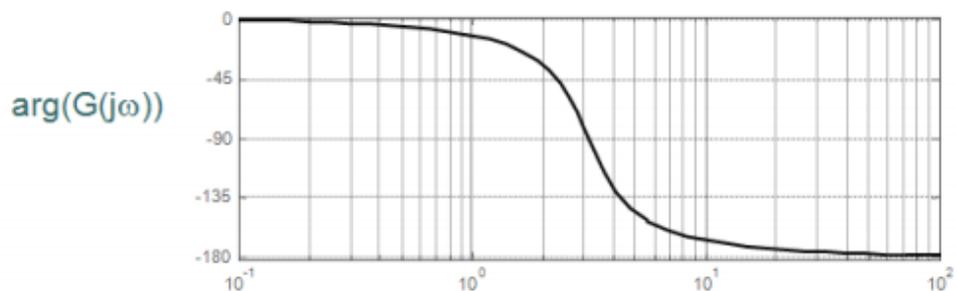


Figura 28: Representación Desfase / Frecuencia.

El método empleado para la identificación de sistemas mediante la respuesta en frecuencia es la aproximación asintótica de líneas rectas sobre la gráfica de amplitud / frecuencia. Las consideraciones a tener en cuenta para la aplicación de este método son:

- Para el diagrama de amplitud:
 - Término constante k: añade un valor constante 20log (k).
 - Un polo simple añade pendiente de -20 db/década a partir del valor del polo.
 - Un cero simple añade una pendiente de +20 db/década a partir del valor del cero.

- Un par de polos complejos añade una pendiente de - 40 db/década a partir del valor del módulo de los polos. Si x es pequeño, hay pico de resonancia.
- Un par de ceros complejos añade una pendiente de +40 db/década a partir del valor del módulo de los ceros. Si x es pequeño, hay pico de resonancia.
- Un polo en el origen (1/s) añade una pendiente de -20 db/década en todas las frecuencias.
- Un cero en el origen (s) añade con una pendiente de +20 db/década en todas las frecuencias.
- Para el diagrama de fase:
 - Término constante k: no contribuye.
 - Un polo simple: 0° para $\omega=0$, -90° para $\omega=\infty$.
 - Un cero simple: 0° para $\omega=0$, $+90^\circ$ para $\omega=\infty$.
 - Un par de polos complejos: 0° para $\omega=0$, -180° para $\omega=\infty$.
 - Un par de ceros complejos: 0° para $\omega=0$, $+180^\circ$ para $\omega=\infty$.
 - Un polo en el origen (1/s): -90° en todas las frecuencias.
 - Un cero en el origen (s): $+90^\circ$ en todas las frecuencias.
 - Un cero simple positivo: 0° para $\omega=0$, -90° para $\omega=\infty$.
 - Un retardo puro (e^{-sT}): fase = $-\omega T$.

Si se emplea la respuesta en frecuencia para la identificación de un sistema hay que tener presente la zona de identificación posible, esto quiere decir, que no toda la gráfica obtenida es válida para la identificación. A continuación, se muestra una gráfica en la cual al final se obtiene una oscilación inesperada, que indica que el sistema presenta retardo.

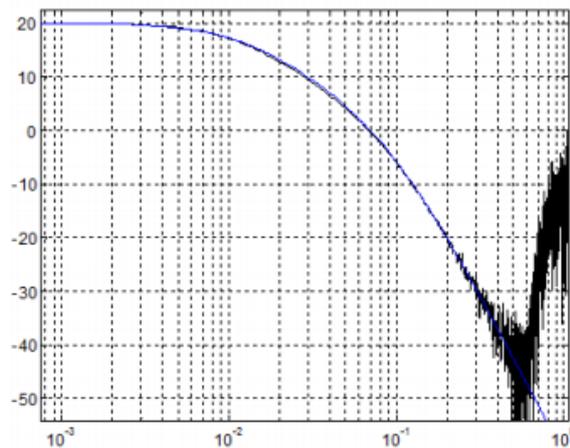


Figura 29: Comprobación Magnitud, oscilación a partir de 0.5 Hz.

Aplicando retardo, se obtiene una gráfica en la cual se ajusta casi perfectamente la fase esperada.

$$G(s) = \frac{10}{(1 + s/0.011)(1 + s/0.094)^2} e^{-5.15s}$$

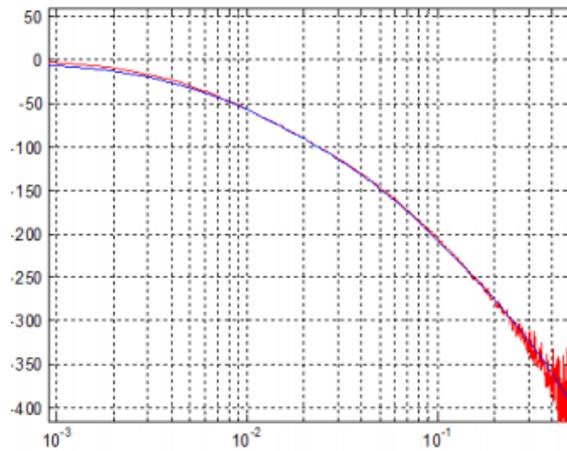


Figura 30: Comprobación Fase.

2.7.1.3. Identificación mediante mínimos cuadrados

Este método de identificación consiste en obtener el equivalente discreto de un sistema continuo lineal. Para ello se debe especificar el periodo de muestreo y el intervalo de valores continuos que equivalen a un mismo valor discreto.

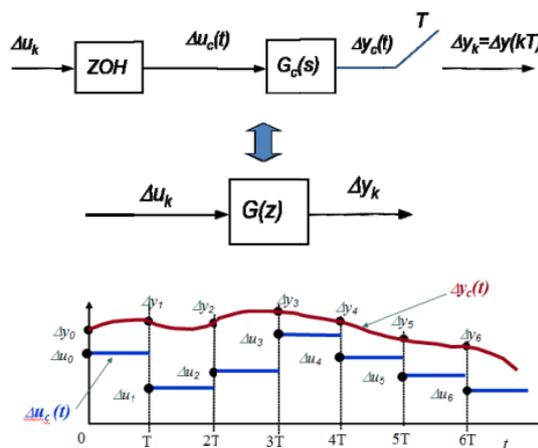


Figura 31: Proceso de muestreo.

Aplicando la transformada Z se obtiene la función discreta del sistema:

$$G(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

$$\Delta y_k + a_1 \Delta y_{k-1} + a_2 \Delta y_{k-2} = b_1 \Delta u_{k-1} + b_2 \Delta u_{k-2}$$

El experimento se lleva a cabo con los siguientes pasos:

- Se aplica una entrada constante hasta que el sistema llega al equilibrio.

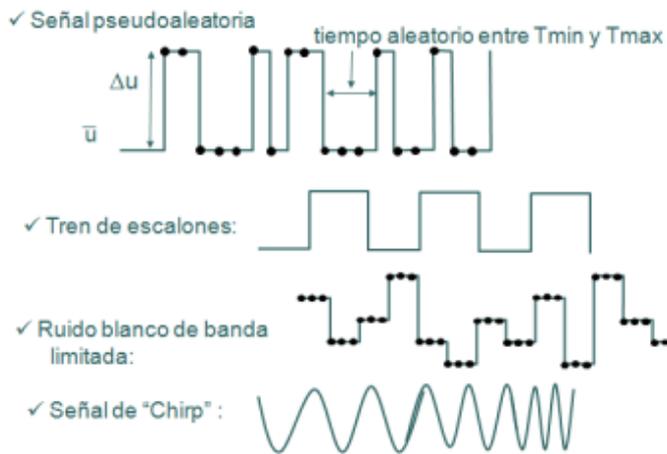


Figura 32: Señales de entrada usuales.

- Se produce el cambio de la entrada para obtener variación de la salida.
- Restando el valor del punto de equilibrio se obtiene la secuencia de entrada y salida, es decir, $\Delta u_0, \Delta u_1, \dots, \Delta u_N$ y $\Delta y_0, \Delta y_1, \dots, \Delta y_N$.
- Se plantea el sistema de ecuaciones a resolver (no tiene solución, porque tiene más ecuaciones que incógnitas).
- Se definen los errores de las ecuaciones como:

$$\begin{cases} e_2 = \Delta y_2 - (-a_1 \Delta y_1 - a_2 \Delta y_0 + b_1 \Delta u_1 + b_2 \Delta u_0) \\ e_3 = \Delta y_3 - (-a_1 \Delta y_2 - a_2 \Delta y_1 + b_1 \Delta u_2 + b_2 \Delta u_1) \\ \vdots \\ e_N = \Delta y_N - (-a_1 \Delta y_{N-1} - a_2 \Delta y_{N-2} + b_1 \Delta u_{N-1} + b_2 \Delta u_{N-2}) \end{cases}$$

- Se reorganiza de la siguiente forma matricial:

$$Y = \begin{bmatrix} \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \\ \vdots \\ \Delta y_N \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} -\Delta y_1 & -\Delta y_0 & \Delta u_1 & \Delta u_0 \\ -\Delta y_2 & -\Delta y_1 & \Delta u_2 & \Delta u_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\Delta y_{N-1} & -\Delta y_{N-2} & \Delta u_{N-1} & \Delta u_{N-2} \end{bmatrix} \quad \theta = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix}$$

$$Y = X \cdot \theta \quad \Rightarrow \quad E = Y - X \cdot \theta$$

- Finalmente se resuelve el sistema de forma que se minimiza la suma de errores al cuadrado, es decir, minimiza: $E^T E = \sum e_i^2$ y la solución es: $\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$ como:

(Novelo, 2013)

2.7.1.4. Determinación de la función de transferencia utilizando software

La herramienta “Ident” de Matlab es una aplicación para la construcción de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos de entrada-salida medidos. Permite crear y usar modelos de sistemas dinámicos que no se modelan fácilmente a partir de los primeros principios o especificaciones. Se pueden usar datos de entrada y salida en el dominio de tiempo y en el dominio de la frecuencia para identificar funciones de transferencia de tiempo discreto y tiempo continuo, modelos de proceso y modelos de espacio de estado. La caja de herramientas también proporciona algoritmos para la estimación de parámetros integrados en línea.

Cuando se preparan datos para identificar modelos, se debe especificar información tal como los nombres de los canales de entrada y salida, el tiempo de muestreo y el comportamiento entre muestras. Ident permite adjuntar esta información a los datos, lo que facilita la visualización de datos, la conversión del dominio y varias tareas de pre procesamiento.

Los datos medidos a menudo tienen desplazamientos, derivas lentas, valores atípicos, valores perdidos y otras anomalías. Ident elimina tales anomalías mediante la realización de operaciones de desviación, filtrado, re-muestreo y reconstrucción de datos faltantes. Además, puede analizar la idoneidad de los datos para la identificación y proporcionar diagnósticos sobre la existencia de circuitos de retroalimentación y la presencia de no linealidades.

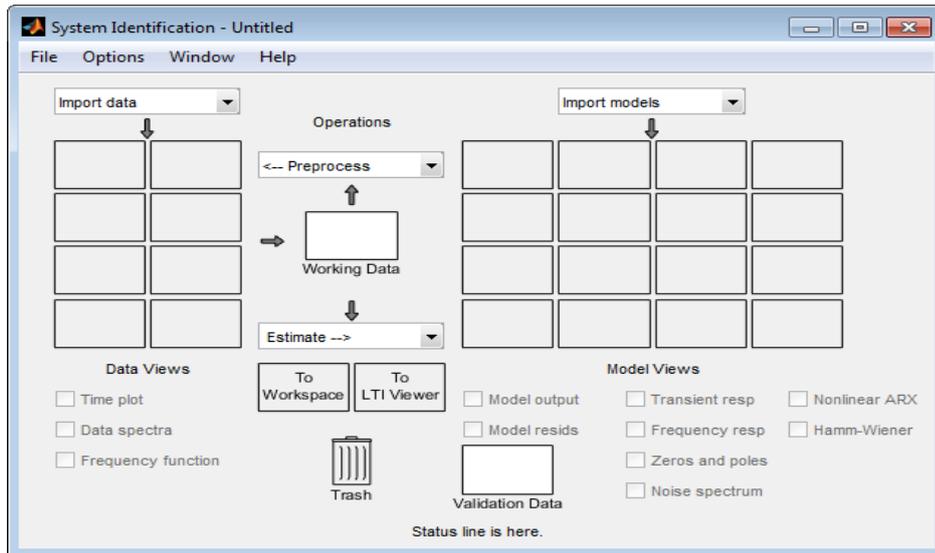


Figura 33: Importación de datos en Ident.

Ident también estima la respuesta al escalón y la respuesta en frecuencia del sistema a partir de los datos medidos. Con estas respuestas, puede analizar las características del sistema, como las constantes de tiempo dominantes, los retardos de entrada y las frecuencias de resonancia. También puede usar estas características para configurar los modelos paramétricos durante la estimación.

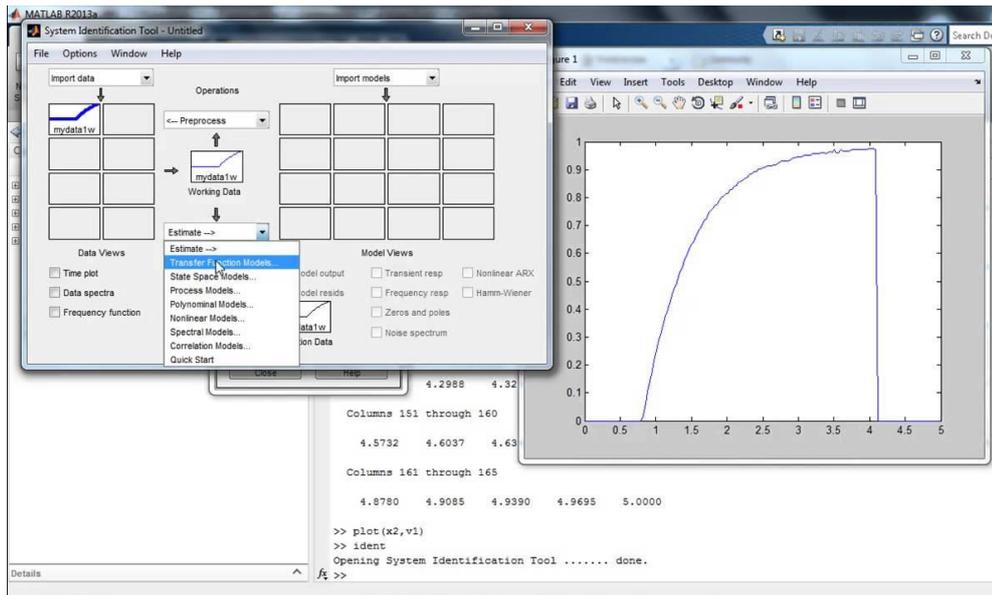


Figura 34: Respuesta a la entrada escalón en Ident.

Los modelos paramétricos, como las funciones de transferencia o los modelos de espacio de estado, usan una pequeña cantidad de parámetros para capturar la dinámica del sistema. Ident estima los parámetros del modelo y sus incertidumbres a partir de los datos de tiempo-respuesta y frecuencia-respuesta. Se puede analizar estos modelos usando

gráficos de tiempo-respuesta y frecuencia-respuesta, como escalón, impulso, diagramas de Bode y mapas de polos y ceros.

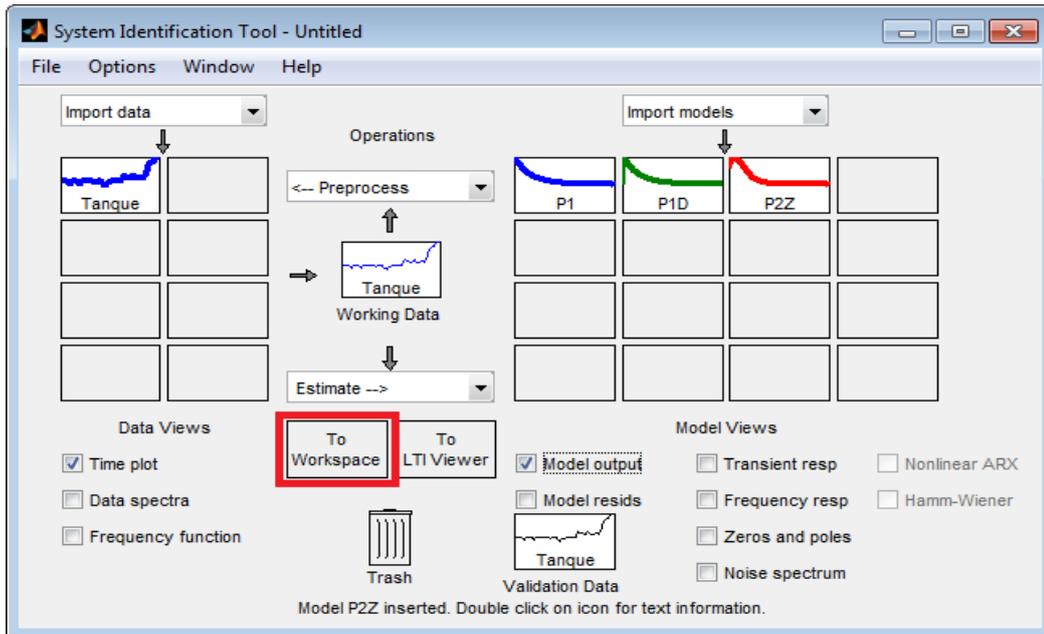


Figura 35: Función de transferencia en Ident.
(MATLAB - MathWorks, s.f.)

2.7.2. Métodos de sintonización de controladores PID

Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones del transitorio y del estado estacionario del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID.

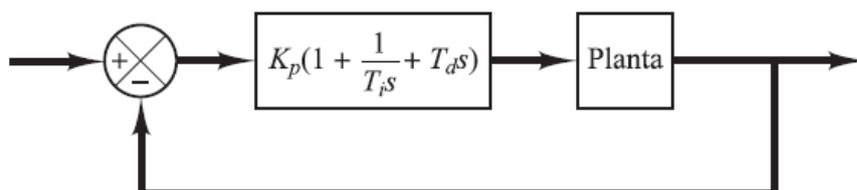


Figura 36: Control PID de una planta.

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador.

Ziegler y Nichols sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID (esto significa dar valores a K_p , T_i y T_d) basándose en las respuestas escalón experimentales o en el valor de K_p que produce estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional. Las reglas de Ziegler-Nichols, que se presentan a continuación, son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas. (Por supuesto, estas reglas se pueden aplicar al diseño de sistemas con modelos matemáticos conocidos.) Tales reglas sugieren un conjunto de valores de K_p , T_i y T_d que darán una operación estable del sistema. No obstante, el sistema resultante puede presentar una gran sobreelongación en su respuesta escalón de forma que resulte no aceptable. En tales casos se necesitará una serie de ajustes finos hasta que se obtenga el resultado deseado. De hecho, las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols dan una estimación razonable de los parámetros del controlador y proporcionan un punto de partida para una sintonía fina, en lugar de dar los parámetros K_p , T_i y T_d en un único intento.

2.7.2.1. Reglas de Ziegler y Nichols

Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , basándose en las características de respuesta transitoria de una planta dada. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o sintonía de controladores PID la pueden realizar los ingenieros mediante experimentos sobre la planta. (Después de la propuesta inicial de Ziegler-Nichols han aparecido numerosas reglas de sintonía de controladores PID. Estas reglas están disponibles tanto en publicaciones técnicas como de los fabricantes de estos controladores.

Hay dos métodos denominados reglas de sintonía de Ziegler-Nichols: el primero y el segundo método. A continuación, se hace una breve presentación de estos dos métodos.

2.7.2.1.1. Primer método

En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, tal como se muestra en la figura 36.

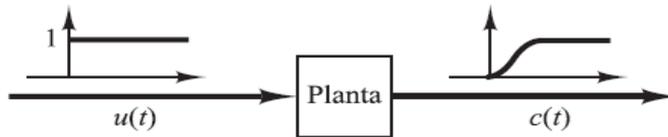


Figura 36: Respuesta a un escalón unitario de una planta.

Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, como se observa en la figura 37.

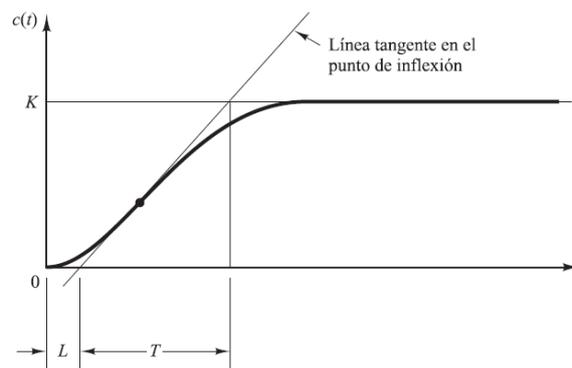


Figura 37: Curva de respuesta en forma de S.

Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S. Tales curvas de respuesta escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta.

La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea $c(t) = K$. En este caso, la función de transferencia $C(s)/U(s)$ se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo del modo siguiente:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr} (primer método).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

El controlador PID sintonizado mediante el primer método de las reglas de Ziegler-Nichols produce:

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \\
 &= 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s}
 \end{aligned}$$

Por tanto, el controlador tiene un polo en $s = 0$ y un cero doble en $s = -1/L$.

2.7.2.1.2. Segundo método

En el segundo método, primero se fija $T_i = \infty$ y $T_d = 0$. Usando sólo la acción de control proporcional (véase la Figura 38), se incrementa K_p desde 0 hasta un valor crítico K_{cr} , en donde la salida presente oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar K_p , entonces este método no se puede aplicar.) Así, la ganancia crítica K_{cr} y el periodo P_{cr} correspondiente se determinan experimentalmente.

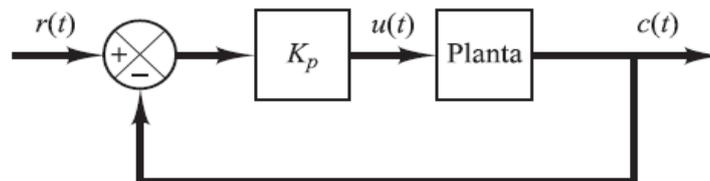


Figura 38: Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional.

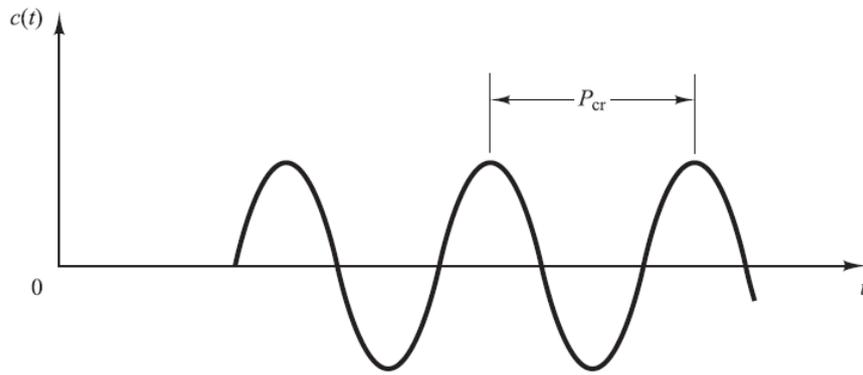


Figura 39: Oscilación sostenida con periodo P_{cr} (P_{cr} se mide en seg.).

Ziegler-Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr} (segundo método).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

El controlador PID sintonizado mediante el segundo método de las reglas de Ziegler-Nichols produce:

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 0.6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s \right) \\
 &= 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s}
 \end{aligned}$$

Por tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s = -4 / P_{cr}$.

Conviene darse cuenta de que, si el sistema tiene un modelo matemático conocido (como la función de transferencia), entonces se puede emplear el método del lugar

de las raíces para encontrar la ganancia crítica K_{cr} y las frecuencias de las oscilaciones sostenidas ω_{cr} , donde $2\pi/\omega_{cr} = P_{cr}$. Estos valores se pueden determinar a partir de los puntos de cruce de las ramas del lugar de las raíces con el eje $j\omega$. (Obviamente, si las ramas del lugar de las raíces no cortan al eje $j\omega$ este método no se puede aplicar.) (Ogata, 2010)

2.7.2.2. Método de sintonización por ensayo sistemático

Este método de ajuste requiere que el controlador y el proceso estén operando normalmente.

El procedimiento general consiste en empezar con un ajuste ancho de todas las acciones y estrecharlas poco a poco, en pasos sucesivos, hasta obtener la estabilidad deseada. En otras palabras, iniciar el ajuste con acción poco agresiva, o lo que es igual, valores conservadores. Este método emplea la reacción del lazo cerrado en un sistema que está bajo control, siendo el más utilizado en la práctica.

2.7.2.2.1. Sintonización de un controlador con acción proporcional

Este tipo de controlador tiene ajustable solamente la constante de proporcionalidad (ganancia). Si aumenta la ganancia, aumenta la inestabilidad. Por otro lado, si disminuye la ganancia, la desviación permanente u offset aumenta.

Teniendo en cuenta estas características se debe empezar el ajuste con una ganancia pequeña, aumentándola gradualmente en pasos sucesivos al mismo tiempo que se van realizando cambios de carga. Después de cada ajuste y cambio de carga siguiente, se debe observar la respuesta del proceso hasta que se consiga la estabilidad deseada. Puede considerarse terminado el ajuste del controlador cuando la respuesta de la variable controlada, ante un cambio de carga, tenga una relación de amortiguamiento de 0,25.

2.7.2.2.2. Sintonización de un controlador con acción proporcional más integral

La mayor parte de los controladores instalados en la industria disponen de estas dos acciones de control, por lo que necesitan dos tipos de ajuste:

- Ganancia proporcional
- Tiempo de reajuste o tiempo integral

El ajuste por ensayo sistemático se realiza en dos pasos:

- *Paso 1:* Con el tiempo integral a su más alto valor, se debe seguir el procedimiento descrito para el controlador proporcional, aumentando la ganancia hasta que se obtenga una relación de amortiguamiento de aproximadamente 0,25. Después se disminuye la ganancia ligeramente.
- *Paso 2:* Mantener la ganancia en el último valor obtenido en el paso 1. Después, empezando con el tiempo integral más alto, se va disminuyendo en pequeños incrementos, creando al mismo tiempo cambios de carga con el punto de consigna hasta que la oscilación se considere excesiva en amplitud. A continuación, aumentar ligeramente el tiempo integral.

2.7.2.2.3. Sintonización de un controlador con acción proporcional más derivativa

Para llevar a cabo este ajuste por el método de ensayo sistemático se requieren dos pasos:

- *Paso 1:* Con el tiempo derivativo a cero, o su mínimo valor, se debe seguir el procedimiento descrito para el controlador proporcional, aumentando la ganancia hasta que se obtenga una relación de amortiguamiento de aproximadamente 0,25.
- *Paso 2:* Mantener la ganancia en el último valor obtenido en el paso 1. Después, empezando con el tiempo derivativo más bajo, se va aumentando en pequeños incrementos, creando al mismo tiempo cambios de carga con el punto de consigna hasta que la oscilación se considere excesiva en amplitud. A continuación, reducir ligeramente el tiempo derivativo. Después se puede aumentar ligeramente la ganancia proporcional para mejorar el comportamiento del tiempo derivativo.

2.7.2.2.4. Sintonización de un controlador con acción proporcional, integral y derivativa

Para realizar este ajuste por el método de ensayo sistemático se requieren tres pasos:

- *Paso 1:* Con el tiempo integral a su máximo valor y el tiempo derivativo a cero se debe seguir el procedimiento descrito para el controlador

proporcional, aumentando la ganancia hasta que se obtenga una relación de amortiguamiento de aproximadamente 0,25.

- *Paso 2:* Mantener la ganancia en el último valor obtenido en el paso 1.
- Empezando con el tiempo integral más alto se va disminuyendo en pequeños incrementos, creando al mismo tiempo cambios de carga con el punto de consigna, hasta que la oscilación sea excesiva.
- *Paso 3:* Con la ganancia y tiempo integral en los últimos valores obtenidos en los pasos 1 y 2, aumentar el tiempo derivativo en pequeños incrementos, creando al mismo tiempo cambios de carga con el punto de consigna, hasta que la oscilación sea excesiva. A continuación, reducir ligeramente el tiempo derivativo.
- Con posterioridad se puede aumentar ligeramente la ganancia proporcional para mejorar el resultado del tiempo derivativo.

2.7.2.2.5. Efecto de los parámetros de sintonía

Un ajuste excesivamente crítico de los parámetros de sintonía en los controladores con acción proporcional, integral y derivativa puede ocasionar oscilación en los ciclos de respuesta. En la práctica, la dificultad está en conocer qué acción tiene un ajuste demasiado crítico, puesto que los ciclos pueden ser debidos a cualquiera de ellas.

Para distinguir los tipos de ciclo se puede utilizar la regla siguiente:

- El ciclo debido a la acción integral tiene un período relativamente largo. Al disminuir el tiempo integral aumenta la oscilación, pero con un período largo.
- El ciclo debido a la acción proporcional tiene un período relativamente moderado. Al aumentar la ganancia proporcional aumenta la oscilación, aumentando su frecuencia.
- El ciclo debido a la acción derivativa tiene un período relativamente corto. Al aumentar el tiempo derivativo aumenta la oscilación. En este caso la frecuencia de oscilación es la más alta de todas. (Sánchez, 2003)

DISEÑO DEL SISTEMA

CAPITULO III

3.1. Introducción

A continuación, se describirá el funcionamiento de nuestro sistema de control de un sistema de temperatura de un tanque de agua y la instrumentación necesaria para lograr este control. Además, se ilustrarán: El diagrama de bloques del sistema, diagrama P&ID, se realizará una

descripción del software, identificación de Señales de Control y Monitoreo, se detallará el programa del PLC y el panel HMI.

3.2. Descripción del Sistema

En el siguiente proyecto se utilizará para el control de un sistema de temperatura de un tanque de agua de un sensor PT100, un PLC M340, un HMI MAGELIS STU de la Marca SHNEIDER ELECTRIC los cuales se encargarán de controlar y monitorizar las variables que intervendrán en el proceso.

Las variables por monitorear y controlar son las siguientes:

- Medición de la temperatura.
- Constantes PID.

3.3. Descripción física del sistema

El sistema cuenta con un sensor de temperatura, PLC M340, un módulo de e/s analógicas, un HMI STU 855, un LCB (Local Control Box), entre otros.

Se ha asignado una función específica para cada elemento del LCB (Local Control Box) como muestra la siguiente tabla:

Tabla 3: Descripción Local Box.

Ítem	Elemento	Función	Tipo	Estado
1	Selector de dos posiciones	Local / Remoto	DI	1: LOCAL 1: REMOTO
2	Pulsador Verde	Marcha Sistema	DI	NA
3	Pulsador Rojo	Paro Sistema	DI	NC
4	Piloto Verde	Sistema Funcionando	DO	NA
5	Piloto Amarillo	Sistema Alimentado	DO	NA
6	Piloto Rojo	Nivel Adecuado	DO	NA
8	Potenciómetro	Referencia Temperatura	AI	0-10V

DI: Digital Input

DO: Digital Output

NA: Normalmente abierto

NC: Normalmente cerrado

3.4. Identificación de Señales de Control y Monitoreo

Tabla 4: Señales de control y monitoreo.

DESCRIPCIÓN	TIPO DE SEÑAL
Selector Local	Discreta
Selector Remoto	Discreta
Marcha Sistema	Discreta
Paro Sistema	Discreta
Piloto Sistema Funcionando	Discreta
Piloto Nivel Adecuado	Discreta
Bomba	Discreta
Sensor de Nivel	Discreta
Sensor/Transmisor de Temperatura	Analógica
Potenciómetro	Analógica

3.5. Diagrama de bloques del sistema de control

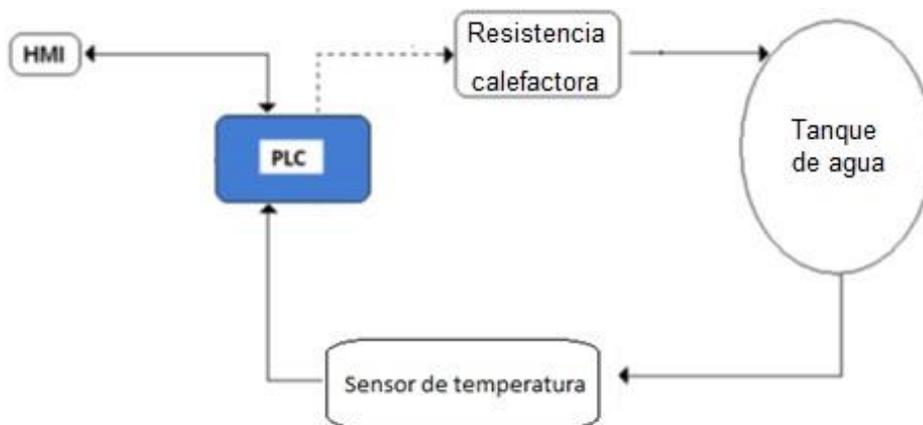


Figura 40: Diagrama de bloques del sistema.

3.6. Diagrama P&ID

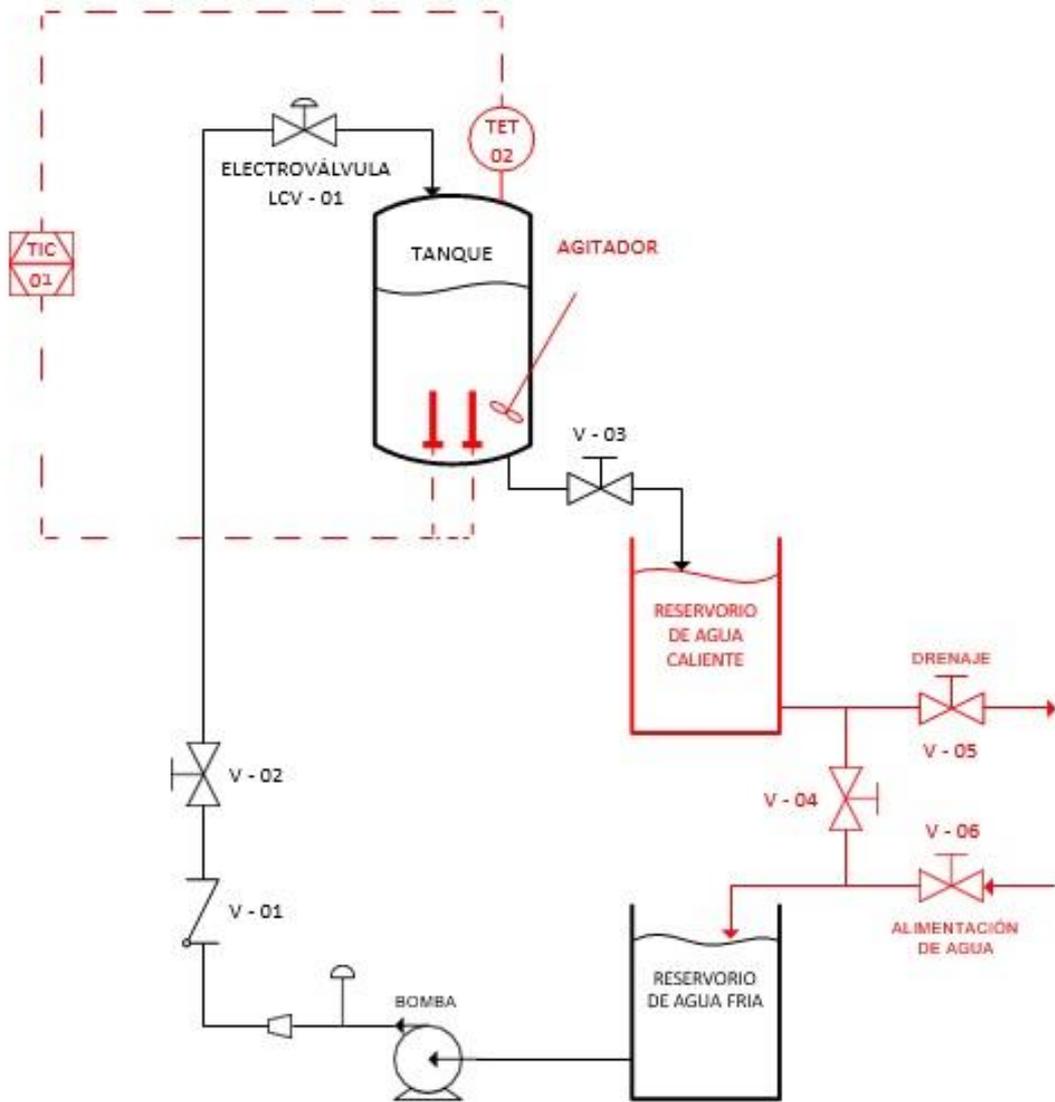


Figura 41: Diagrama P&ID del sistema.

3.7. Selección de Equipos

3.7.1. Especificación de Instrumentación

3.7.1.1. Resistencia eléctrica 2000w

Para realizar una adecuada selección de la resistencia calefactora, se establecieron primero las siguientes consideraciones:

- Volumen de agua a calentar = 15 Litros (0.015 m³)
- Densidad del agua (20°C) = 998.29 Kg/m³
- Capacidad calorífica del agua (20°C) = 4.182 KJ/Kg °C
- Diferencia de temperatura requerida = 10°C
- Tiempo límite para el calentamiento = 180 segundos

Teniendo en cuenta estos datos, se calculó el flujo de calor que requiere generar la resistencia calefactora mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_{resistencia} = M * Cp * \Delta T$$
$$Q_{resistencia} = \frac{Q_{resistencia}}{t_{límite}} = \frac{M * Cp * \Delta T}{t_{límite}} = \frac{V * \rho * Cp * \Delta T}{t_{límite}}$$
$$Q_{resistencia} = \frac{0.015 * 998.29 * 4.182 * 10}{180} = 3.48 \text{ KW}$$

Se obtiene que la resistencia debe suministrar un flujo de calor de 3.48 KW. Por lo cual se adquirieron dos resistencias de 2 KW cada una, las cuales generan el calor requerido cuando operan conjuntamente. A continuación, sus principales características:

- Material: Cobre niquelado
- Rango de temperatura: 15°C a 86°C
- Conexión a proceso: 1"
- Instalación: Vertical



Figura 42: Resistencia calefactora de 2 KW

3.7.1.2. Sensor de Temperatura

Uno de los requerimientos más importantes en la implementación del módulo es que sea de bajo costo, por ello el sensor a seleccionar debe ser económico. Asimismo, se busca que su tamaño y forma sean los apropiados para ser instalado adecuadamente dentro del tanque. Además, debe ser capaz de medir valores de temperatura dentro del rango 20°C a 50°C con una precisión menor o igual a 1°C.

En base a estos requisitos, se seleccionó una PT 100 las cuales son levemente más costosas y mecánicamente no tan rígidas como las termocuplas, pero las superan en precisión especialmente en aplicaciones de temperaturas bajas (-100°C a +200°C).



Figura 43: Sensor PT 100.

Datos Técnicos:

- Rango de Trabajo: -100°C hasta 400°C
- Conexión: 3 Hilos
- Dimensiones: 0.5x10cm (D * L)
- Longitud del cable: 0.5m
- Diámetro de la rosca: 8mm/0.31"
- Longitud de cable: 1m
- Material de sonda: acero inox.
- Resistente al agua

3.7.1.3. Transductor PT 100



Figura 44: Transductor PT 100.

Datos Técnicos:

- Corriente de excitación: $\leq 800\mu\text{A}$
- Precisión: $\pm 0.2\% \text{ F.S}$
- Coeficiente de temperatura: $\leq 150\text{ppm/K.F.S}$
- Operating temperatura: $-20^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$
- Humedad de funcionamiento: $<98\% \text{ RH}$
- Presión de aire de funcionamiento: $80\text{-}110\text{kPa}$
- Potencia: $24 \text{ V DC } \pm 10\%$
- Salida: $4\text{-}20\text{mA}$
- Límite de corriente de salida: 26mA

3.8. Especificación del Sistema de Control

3.8.1. Unidad Central de Procesamiento

Para la elección del PLC se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El CPU deberá tener la capacidad de leer todas las entradas, realizar la lógica de control y controlar las salidas a campo.
- El CPU se deberá poder programar en lógica de escalera(ladder).

De acuerdo con estas consideraciones en el proyecto se utilizó la Unidad Central de procesamiento Modicon BMXP342020.



Figura 45: PLC Modicon BMXP342020

Datos Técnicos:

- | | |
|-----------------------------------|---|
| • Rango de producto | Plataforma autom. Modicon M340 |
| • Tipo de producto | Módulo de procesador |
| • Número de racks | 4 |
| • Número de ranuras | 11 |
| • Capacidad del procesador de E/S | |
| Digitales | 1024 E/S configuración multibastidor
704 E/S configuración de 1 bastidor |
| • Capacidad del procesador E/S | |
| analógicas | 256 E/S configuración multibastidor
66 E/S configuración de 1 bastidor |

3.8.2. Módulo de Entradas y Salidas

3.8.2.1. Módulo de Entradas y salidas Analógicas

Para la elección del Módulo de Entradas y Salidas Analógicas se tuvo en cuenta las especificaciones del Sensor de Temperatura y de las tarjetas de acoplamiento de las resistencias eléctricas.

De acuerdo con estas Consideraciones en el proyecto se utilizó el Módulo de entradas analógicas BMXAMM0600.



Figura 46: Módulo de entradas y salidas analógicas
BMXAMM0600

Datos Técnicos:

- Protección del módulo contra sobretensiones
- Conversión de señales digitales (11 bits o 12 bits según la gama) a señales analógicas
- Conversión de datos de aplicación a datos que puede utilizar el convertidor digital/analógico
- Supervisión de módulo e indicación de fallos de la aplicación: prueba de convertidor, prueba de sobredisparo de gama, prueba de vigilancia
- Para cada entrada, el módulo BMX AMM 0600 ofrece los intervalos siguientes:
 - Tensión: ± 10 V, ± 5 V, 0 a 10 V, 0 a 5 V y 1 a 5 V
 - Corriente: 0...20 mA, 4...20 mA y ± 20 mA, en función de la elección realizada durante la configuración

3.8.2.2. Módulo de entradas y salidas digitales

Para la elección del Módulo de Entradas y Salidas digitales se tuvo en cuenta las especificaciones del Sensor de Temperatura y de las tarjetas de adquisición de las resistencias eléctricas.

De acuerdo con estas Consideraciones en el proyecto se utilizó el Módulo de entradas analógicas BMXDDM3202K.



Figura 47: Módulo de entradas y salidas digitales BMXDDM3202K

Datos Técnicos:

- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| • Gama de producto | Plataforma de automatización |
| Modicon M340 | |
| • Producto o componente tipo | Módulo de E / S discreto |
| • Conexión eléctrica | Conector de 20 vías |
| • Entrada discreta número | 16 |
| • Tipo de entrada | Disipador de corriente |
| • Tensión de entrada discreta | 24 V DC positiva |
| • Número de salida discreta | 16 |
| • Tipo de salida discreta | Estado sólido |

- Tensión de salida discreta

24 V 19 - 30 V DC

3.9. Especificaciones del HMI

Para este proyecto se considera como supervisión local un HMI instalado en el mismo tablero de control con las siguientes características:

Terminal Táctil de 5.7", 320 x 420 píxeles para orificio de 22mm. 65K de colores, alimentación de 24 Vdc. Puertos de comunicación serial Modbus RS-232/RS-485 – RJ-45 y 2 puertos USB.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se propone utilizar el HMI Magelis HMISTU855 de Schneider Electric.



Figura 48: HMISTU855.

Datos Técnicos:

- Tipo de pantalla: pantalla táctil a color QVGA TFT
- Color de la pantalla: 65536 colores
- Resolución de pantalla: 320 x 240 píxeles
- Tamaño de pantalla: 5.7 pulgadas
- Tipo de software: software de configuración
- Designación del software: Vijeo Designer
- Sistema operativo: Magelis
- Descripción de la memoria: memoria de la aplicación, 16 MB
 - Copia de seguridad de datos, 64 kB
- Tipo de conexión integrada:
 - 1 puerto USB (V2.0) mini B USB
 - 1 puerto USB (V2.0) USB tipo A
 - Enlace en serie COM1 hembra RJ45, raten de transmisión ≤ 115.2 kbits / s (RS232C / RS485)

3.10. Especificaciones del Software de Programación del PLC

3.10.1. Unity Pro

Características

Unity Pro es el software de programación, depuración y operación común para las gamas Modicon Premium, Atrium y Quantum PLC. Con sus cinco lenguajes IEC61131-3, todas las herramientas de depuración y diagnóstico, Unity Pro está hecho para aumentar su productividad de desarrollo y la facilidad de mantenimiento. Con Unity Pro, su inversión de software se optimiza, los costos de capacitación se reducen y aprovecha un potencial de desarrollo inigualable.

Beneficios

Aumente su productividad con una conciencia superior

Unity Pro es tan creativo que crea sus normas de aplicación, lo que facilita la reutilización en diferentes aplicaciones y aumenta la productividad y la calidad.

Unity Pro se construye sobre estándares de software de apertura y abre las puertas a una colaboración rápida y fácil con otras herramientas de software del proyecto.

Aplicaciones

- Control de fabricación
- Control de procesos por lotes
- Infraestructura

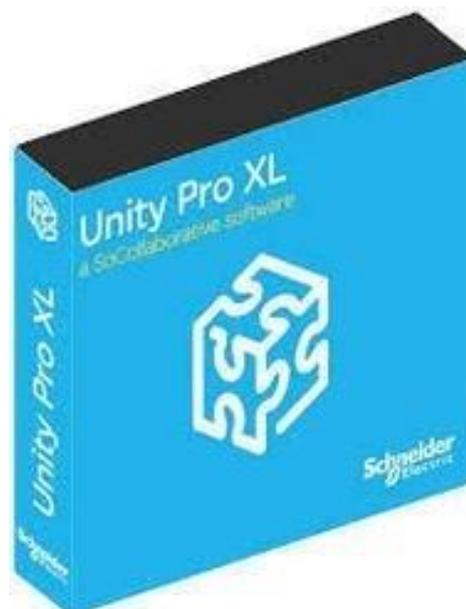


Figura 49: Logo Unity Pro XL.

3.11. Especificaciones del Software de Programación del HMI

3.11.1. Vijeo Designer

Vijeo Designer es una aplicación de software de última generación con la que el usuario puede crear paneles de operadores y configurar parámetros operativos para dispositivos de la interfaz usuario-máquina (HMI). Este programa proporciona todas las herramientas necesarias para el diseño de un proyecto HMI, desde la adquisición de datos hasta la creación y la visualización de sinopsis animadas.

Requisitos Mínimos del sistema

- Procesador Intel Celeron 566 MHz o superior (se recomienda Pentium III 1GHz o superior)
- Memoria 128 MB de RAM (se recomiendan 512 MB o más)
- Espacio en disco disponible 400 MB o más en el disco duro
- Sistema operativo Windows 2000 o XP (inglés, francés, alemán, italiano o español)
- Navegador Web Internet Explorer 5.0 o una versión más reciente

Funciones

- Reutilización de los datos
- Vijeo Designer utiliza dos tipos de datos:
 - los datos internos creados en la aplicación del usuario
 - los datos suministrados por dispositivos externos, como los autómatas y módulos de E/S remotos

Conectividad con varios autómatas

- Gracias a Vijeo Designer el usuario puede configurar un panel HMI con vistas a comunicarse de forma simultánea con varios dispositivos Telemecanique diferentes y con dispositivos de otros fabricantes.

Creación de pantallas HMI

- Vijeo Designer le permite crear pantallas dinámicas para el panel HMI. Combina diferentes funciones en una aplicación sencilla, como objetos en movimiento, niveles de zoom, indicadores de nivel, indicadores de inicio/parada y

conmutadores. La utilización de símbolos animados puede emplearse para crear y editar una pantalla gráfica de forma sencilla.

3.12. Funcionamiento del Sistema

3.12.1. Modo Manual

- Poner el Selector en Manual.
- Pulsar Marcha Manual.
- La electrobomba empieza a funcionar hasta llegar al nivel adecuado.
- Por otro lado, el usuario no podrá arrancar la resistencia eléctrica si el nivel de agua no llega al adecuado indicado por el sensor.
- La temperatura de la resistencia eléctrica variara según el giro del potenciómetro.
- Para parar el sistema pulsar Paro Manual.
- Volver el selector en la posición neutro.

3.12.2. Modo Automático

- Poner el Selector en Automático.
- Pulsar Marcha Automático.
- El PLC estará leyendo continuamente la Temperatura en el sistema por medio del sensor instalado en el tanque.
- Por medio del HMI podremos indicar la referencia de temperatura deseada para el sistema.
- Una vez habilitado marcha mediante el HMI, el PLC ejecutará un PID para tratar de establecer el tanque de agua en la temperatura deseada; se variará la potencia de la resistencia eléctrica.
- Para parar el sistema pulsamos Paro Automático.
- Volver el selector en la posición neutro.
- Por otro lado, el usuario no arrancara la resistencia eléctrica si el nivel de agua no llega al adecuado indicado por el sensor.

3.13. Determinación del modelo matemático de la planta

3.13.1. Rango de linealidad de la planta

Haciendo las respectivas pruebas a la planta en lazo abierto como se muestra en el diagrama de bloques la figura 50, se aplicaron diferentes porcentajes de potencia eléctrica en la resistencia y se midió el valor de la temperatura en estado estacionario. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Valores obtenidos haciendo pruebas experimentales.

Potencia entregada por la resistencia calefactora (%)	Temperatura en estado estable (°C)
0	22.71
10	23.56
20	24.67
30	26.44
40	28.90
50	31.39
60	33.65
70	35.38
80	36.42
90	36.50
100	36.61

Con los valores obtenidos se graficó la curva estática de la planta, la cual se muestra en la figura 59, y nos ayuda a determinar su rango lineal.

Se observa que la zona lineal de la planta está comprendida entre el 20% y el 80% de la potencia disipada por la resistencia eléctrica, una vez excedido este valor la temperatura de la planta pues entra a su regíon de saturación.

Por esta razón, para las pruebas realizadas posteriormente se trabajó con valores de referencia entre 25 °C y 36 °C asegurando la operación dentro del rango lineal de la planta.

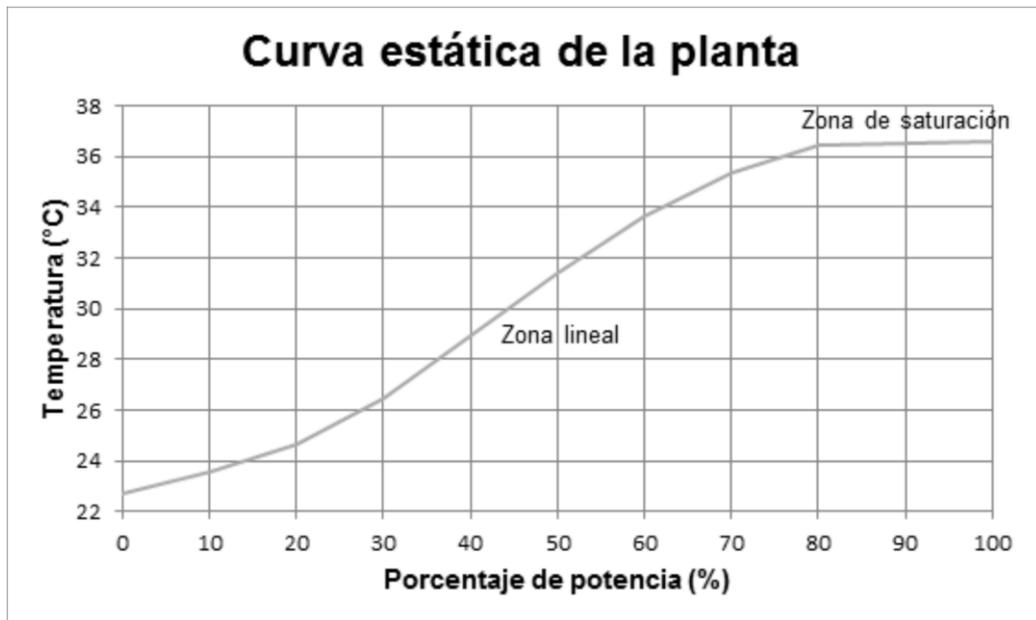


Figura 50: Curva estática de la planta.

3.13.2. Obtención del modelo mediante la respuesta al escalón

Para obtener el modelo matemático del sistema se realizaron pruebas basadas en la curva de respuesta. Estas pruebas se desarrollaron en lazo abierto según el diagrama mostrado en la figura 50, en esta configuración la computadora aún no tiene la función de controlador y es utilizada únicamente para monitorear la variable de temperatura y generar la señal de activación del foco.

Para un cambio de 0% a 30% de potencia disipada, se obtiene la siguiente respuesta:

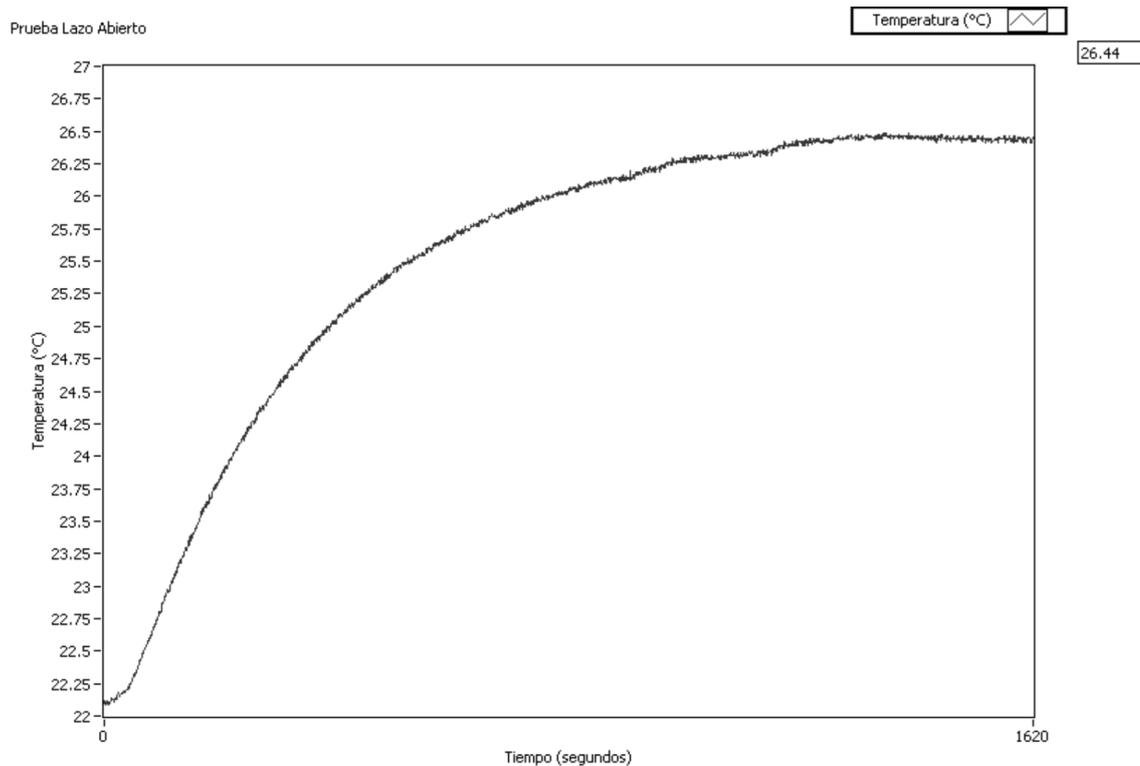


Figura 51: Curva estática de la planta para un cambio de 0% a 30% de potencia.

Para un cambio de 0% a 50% de potencia disipada, se obtiene la siguiente respuesta:

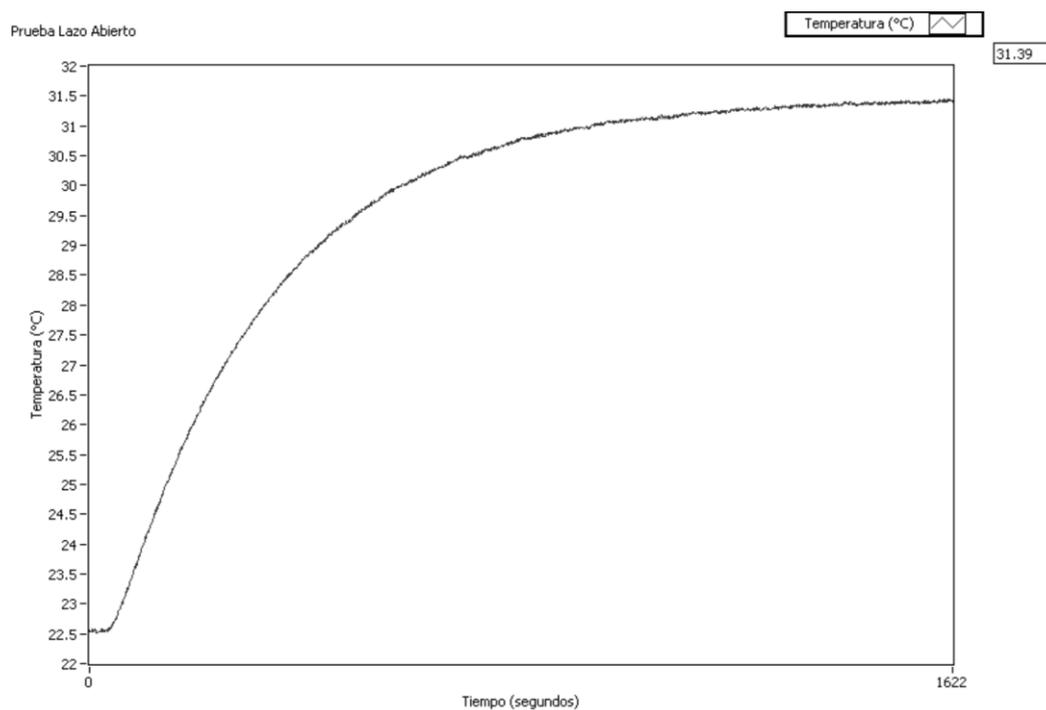


Figura 52: Curva estática de la planta para un cambio de 0% a 50% de potencia.

Para un cambio de 0% a 70% de potencia disipada, se obtiene la siguiente respuesta:

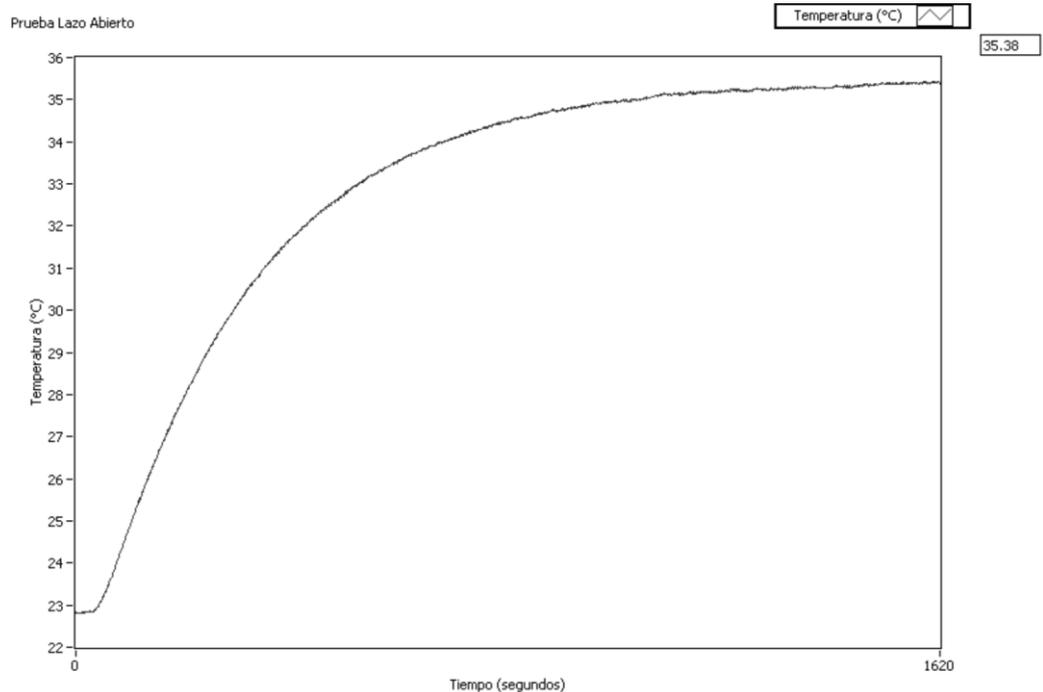


Figura 53: Curva estática de la planta para un cambio de 0% a 70% de potencia.

Una vez obtenidas estas curvas de respuesta se puede identificar que el proceso se comporta como un sistema de primer orden.

Determinación de la constante de tiempo

Para todos los casos observados en los diferentes porcentajes de potencia se observa que la constante de tiempo multiplicada por cinco es de 55 minutos que es el tiempo en que demora en estabilizarse la temperatura de la cámara hecha la prueba en lazo abierto.

Entonces:

$$\tau = 11 \text{ min}$$

Por lo tanto:

$$5 \tau = 55 \text{ min}$$

Determinación de la ecuación de la curva de respuesta

La ecuación de la curva tendrá la siguiente forma:

$$f(t) = V_o - (V_o - V_i) * e^{(-t/\tau)}$$

Esta ecuación resulta de evaluar la curva de respuesta al 40% de la potencia ya que se encuentra dentro del rango de linealidad.

Donde:

V_o = Valor final, V_i = Valor inicial y “ t ” es el tiempo

Reemplazando los valores de la curva de respuesta obtenemos los siguientes valores:

$$V_o = 55.5 \text{ }^\circ\text{C}, V_i = 25.8 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y } T = 11 \text{ min}$$

Por lo tanto la ecuación final es la siguiente:

$$f(t) = 55.5 - 29.7 * e^{(-t/11)}$$

Modelo Matemático final

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación de la curva de respuesta obtenemos la siguiente ecuación:

$$F(s) = \frac{55.5}{s} - \frac{29.7}{s + 0.0909}$$

Al dividir esta ecuación por $U(s) = \frac{29.7}{s}$, podremos hallar la función de transferencia de la planta.

La función de transferencia calculada sería:

$$H = \frac{25.8s + 5.04}{s + 0.0909}$$

3.8. Determinación y simulación del controlador en Matlab

Una vez que se obtiene la función de transferencia de la planta, se procederá a obtener los parámetros de un controlador PID utilizando el software Matlab.

El algoritmo desarrollado en Matlab estará basado en los métodos de Ziegler y Nichols ya que son los más utilizados cuando se quiere obtener un modelo matemático. Adicionalmente, podremos observar en graficas la respuesta al escalón de la planta, la ubicación de los polos y una comparación entre la respuesta original del sistema y la respuesta con el controlador PID.

```

1 - clear all
2 - clc
3 - num = [ 25.8 5.04 ]
4 - den = [ 1 0.0909 ]
5
6 - Gp = tf( num, den )
7 - H = [ 1 ]
8
9 - M = feedback( Gp, H )
10 - step(M)
11 - hold on
12
13 - %%%%%%%%%%%5
14 - Kp = 0
15 - Ki = 0
16 - Kd = 0
17
18 - Gc = pid( Kp, Ki, Kd )
19 - Mc = feedback( Gc*Gp, H )
20 - step(Mc)
21 - grid on

```

Figura 54: Código fuente en Matlab.

Al ejecutar el código anterior obtenemos la ecuación en lazo cerrado con realimentación unitaria:

$$HLC = \frac{25.8s + 5.04}{26.8s + 5.131}$$

Luego podemos observar que se genera una imagen con la respuesta al escalón como se muestra en la figura 54.

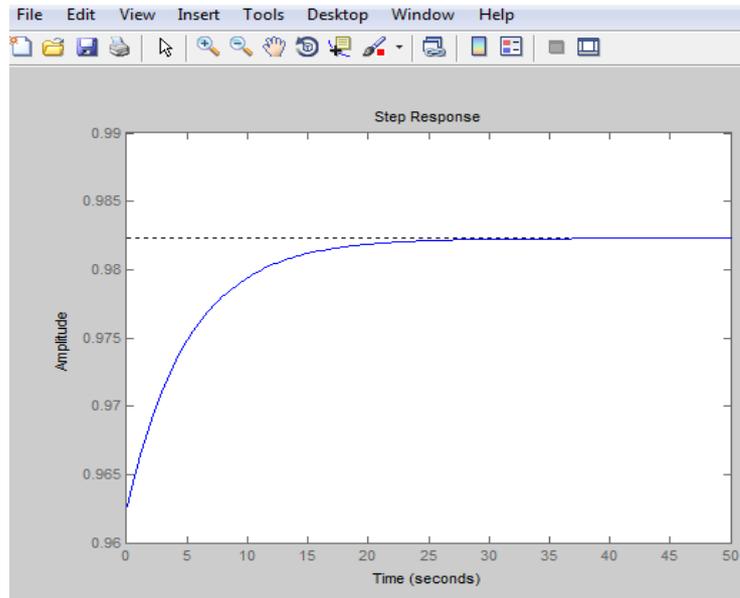


Figura 55: Respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado.

En la figura anterior se puede observar que no se llega a la referencia deseada y además el tiempo de establecimiento es de 30 segundos aproximadamente.

Para mejorar esta respuesta se irán incrementando los parámetros del controlador PID (K_p , K_i , K_d), teniendo en cuenta el efecto que producen sobre la respuesta de la planta.

```

1 - clear all
2 - clc
3 - num = [ 25.8 5.04 ]
4 - den = [ 1 0.0909 ]
5
6 - Gp = tf( num, den )
7 - H = [ 1 ]
8
9 - M = feedback( Gp, H )
10 - step(M)
11 - hold on
12
13 - %%%%%%%%%%%5
14 - Kp = 3
15 - Ki = 0
16 - Kd = 0
17
18 - Gc = pid( Kp, Ki, Kd )
19 - Mc = feedback( Gc*Gp, H )
20 - step(Mc)
21 - grid on

```

Figura 56: Código para obtener la respuesta al escalón con $K_p = 3$.

Al ejecutar el código anterior se generan las siguientes curvas de respuesta al escalón. Los valores de K_p fueron 1, 2 y 3 y las curvas se muestran en la figura 65 con colores negro, amarillo y azul, respectivamente.

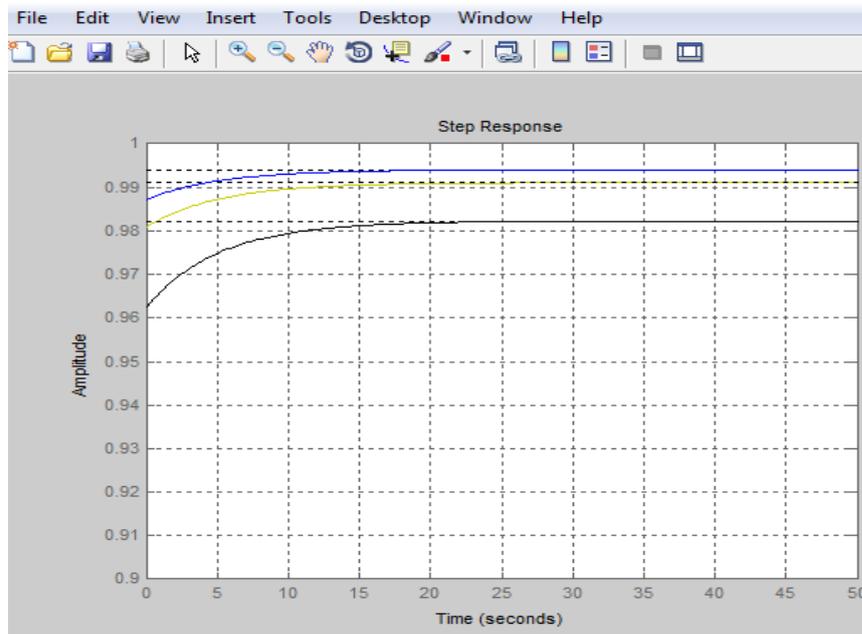


Figura 57: Respuesta al escalón con $K_p = 3$.

Para mejorar la respuesta del sistema, se procedió a incrementar la ganancia integral de uno en uno para ir analizando el comportamiento de la planta.

```

EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Find Files Compare Print EDIT NAVIGATE Breakpoints Run Run and Time Run and Advance Advance
FILE BREAKPOINTS RUN

PID.m* x
1 - clear all
2 - clc
3 - num [ 25.8 5.04 ]
4 - den [ 1 0.0909 ]
5
6 - Gp tf( num, den )
7 - H [ 1 ]
8
9 - M feedback( Gp, H )
10 - step(M)
11 - hold on
12
13 - %%%%%%%%%%%5
14 - Kp 3
15 - Ki 4
16 - Kd
17 - Gc ( 1.0 Kd )
18 - Mc ( 1.1 *Gp, H )
19 - step(Mc)
20 - grid on
21
22

```

Figura 58: Código para obtener la respuesta al escalón con $K_p = 3$ y $K_i = 4$.

Al ejecutar el código anterior se generan las siguientes curvas de respuesta al escalón. El valor de K_p se mantiene en 3 mientras que los valores de K_i fueron 1, 2, 3 y 4. Las curvas se muestran en la figura 58 con color celeste, amarillo y azul y rojo, respectivamente.

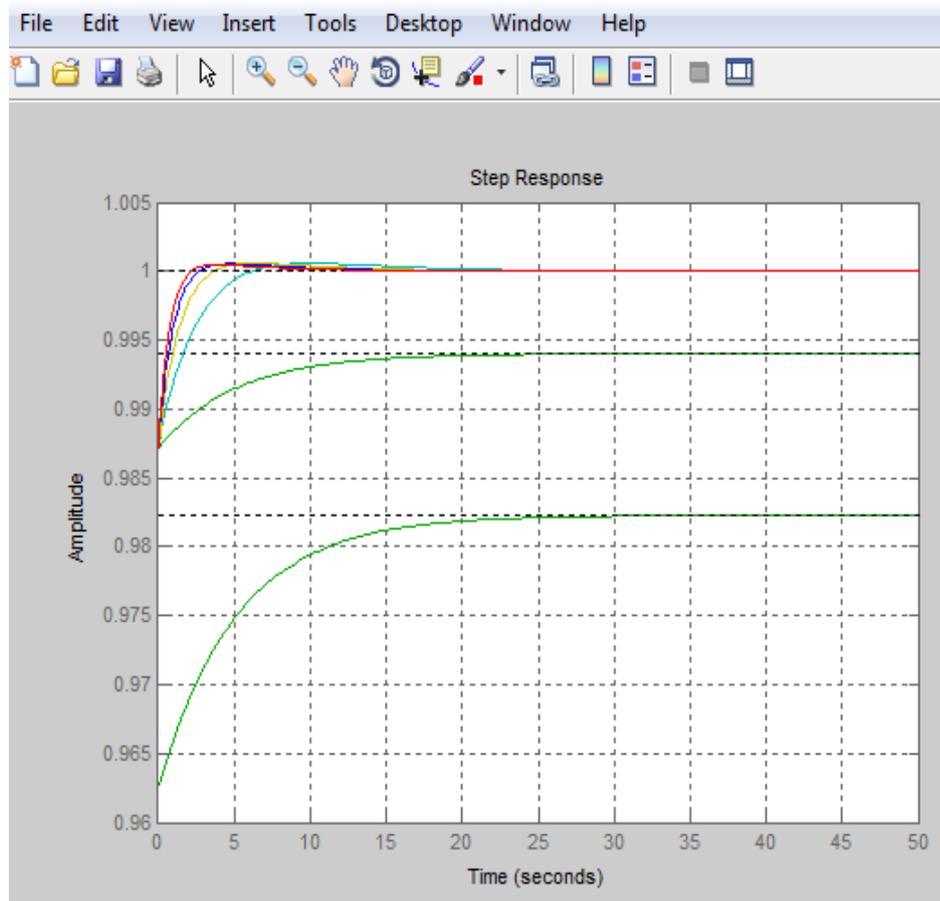


Figura 59: Respuesta al escalón con $K_p = 3$. Y $K_i = 4$.

Con $K_p = 3$, $K_i = 4$ y $K_d = 0$ se obtiene la curva roja que se muestra en la figura anterior, esta respuesta es mejor que con valores más bajos de K_i debido a que se llega a la referencia en menos de 10 segundos.

Por lo tanto, la ecuación del controlador PID es la siguiente:

$$G = K_p + K_i * \frac{1}{s}$$

$$G = 3 + \frac{4}{s}$$

La ecuación de todo el sistema en lazo cerrado y con el controlador PI es la siguiente:

$$M = \frac{77.4s^2 + 118.3s + 20.16}{78.4s^2 + 118.4s + 20.16}$$

3.9. Programación PLC

3.9.1. Direccionamiento de variables en el PLC

Tabla 6: Direccionamiento de variables en el PLC.

Nombre	Tipo	Dirección
Sensor de Temperatura	Int	%IW0.2.1
Potenciómetro	Int	%IW0.2.2
Selector Manual	Ebool	%I0.1.0
Selector Remoto	Ebool	%I0.1.1
Marcha Sistema	Ebool	%I0.1.2
Paro Sistema	Ebool	%I0.1.3
Sensor ON/OFF	Ebool	%I0.1.4
Sistema Funcionando	Ebool	%Q0.1.17

3.9.2. Dimensionamiento del Bastidor

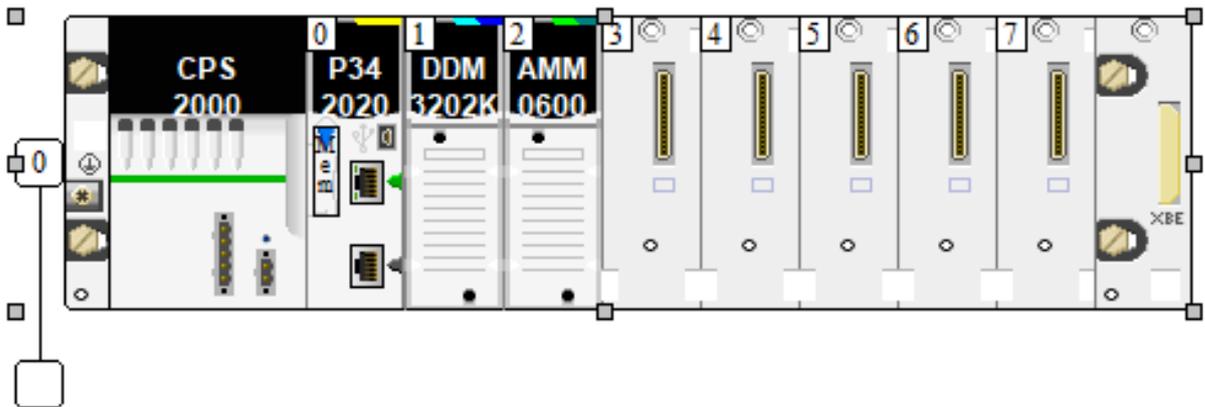


Figura 60: Bastidor.

3.9.3. Configuración Red Ethernet PLC

Familia de modelo: CPU 2020, CPU 2030 (>= V02.00), PRA 0100

Dirección del módulo: Bastidor, Módulo, Canal

Utilidades del módulo: NO, SMTP

Dirección IP del módulo: Dirección IP: 192 . 168 . 1 . 10, Máscara de subred: 255 . 255 . 255 . 0, Dirección de pasarela: 192 . 168 . 1 . 0

Seguridad | **Configuración IP** | Mensajes | SNMP | SMTP | Ancho de banda

Configuración de dirección IP

Configurada
Dirección IP: 192 . 168 . 1 . 10
Máscara de subred: 255 . 255 . 255 . 0
Dirección de pasarela: 192 . 168 . 1 . 1

Desde un servidor
Nombre del dispositivo: _____

Configuración Ethernet

Ethernet II 802.3

Figura 61: Ethernet PLC.

3.9.4. Variables en el Software del PLC

Nombre	Tipo	Comentario	Dirección
Bomba	EBOOL		
Lampara_Nivel_Adecuado	EBOOL		
Selector_Local	EBOOL	Selector Modo Local	%I0.1.0
Selector_Remoto	EBOOL	Selector Modo Remoto	%I0.1.1
Marcha_Sistema	EBOOL	Marcha del Sistema en Modo Automatico	%I0.1.2
Paro_Sistema	EBOOL	Paro del Sistema en Modo Automatico	%I0.1.3
Nivel_Adecuado	EBOOL	Entrada Sensor de Nivel	%I0.1.4
Temperatura	INT	Entrada Temperatura 4-20mah	%IW0.2.1
Pot_Manual_Temperatura	INT	Potenciometro	%IW0.2.2
M_Remoto_Funcionando	EBOOL		%M1
M_Nivel_Adecuado	EBOOL		%M2
M_Marcha	EBOOL		%M3
M_Paro	EBOOL		%M4
M_Lampara_SF	EBOOL		%M5
M_Marcha_HMI	EBOOL		%M5
M_Manual_Funcionando	EBOOL		%M6
M_Paro_HMI	EBOOL		%M6
M_Selector_Remoto	EBOOL		%M13
M_Selector_Local	EBOOL		%M14
M_Sistema_Funcionando	EBOOL		%M15
M_PID	REAL		%MW0
M_Pot	INT		%MW1
M_Pot_Real	REAL		%MW2
M_Pot_Real_0	REAL		%MW2
M_Temperatura	INT		%MW4
M_Temperatura_Scaling	REAL		%MW6
M_Temperatura_Sistema	INT	Nivel del Sistema	%MW7
M_Salida_PID	INT		%MW8
M_Salida_Resistencia	INT		%MW9
M_Salida_Resistencia_Real	REAL		%MW10
M_Pot_Scaling	REAL		%MW20
M_Temperatura_Real	REAL		%MW30
M_Variador_PID	REAL		%MW40
Lampara_Sistema_Funcionando	EBOOL	Lampara Sistema Funcionando	%Q0.1.17
Salida_Resistencia	INT	Salida valor PID a las resistencias	%QW0.2.5

Figura 62: Variables PLC.

3.9.1. Programa para PLC

3.9.1.1. Programa Ladder

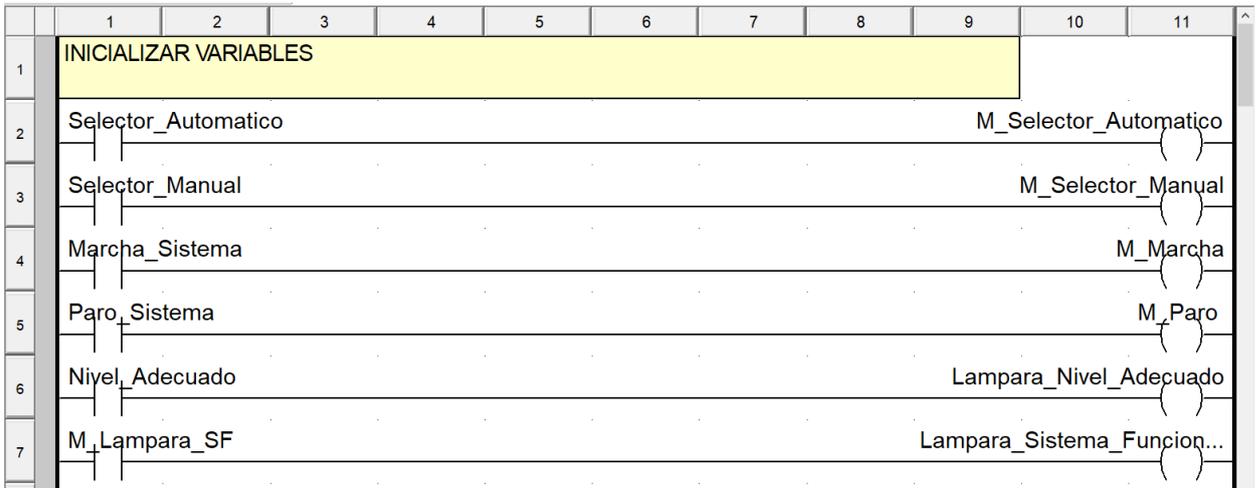


Figura 63: Programa PLC.

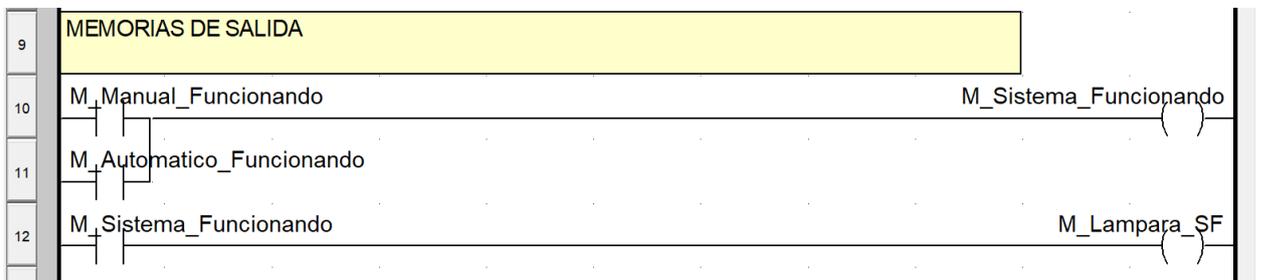


Figura 64: Programa PLC.

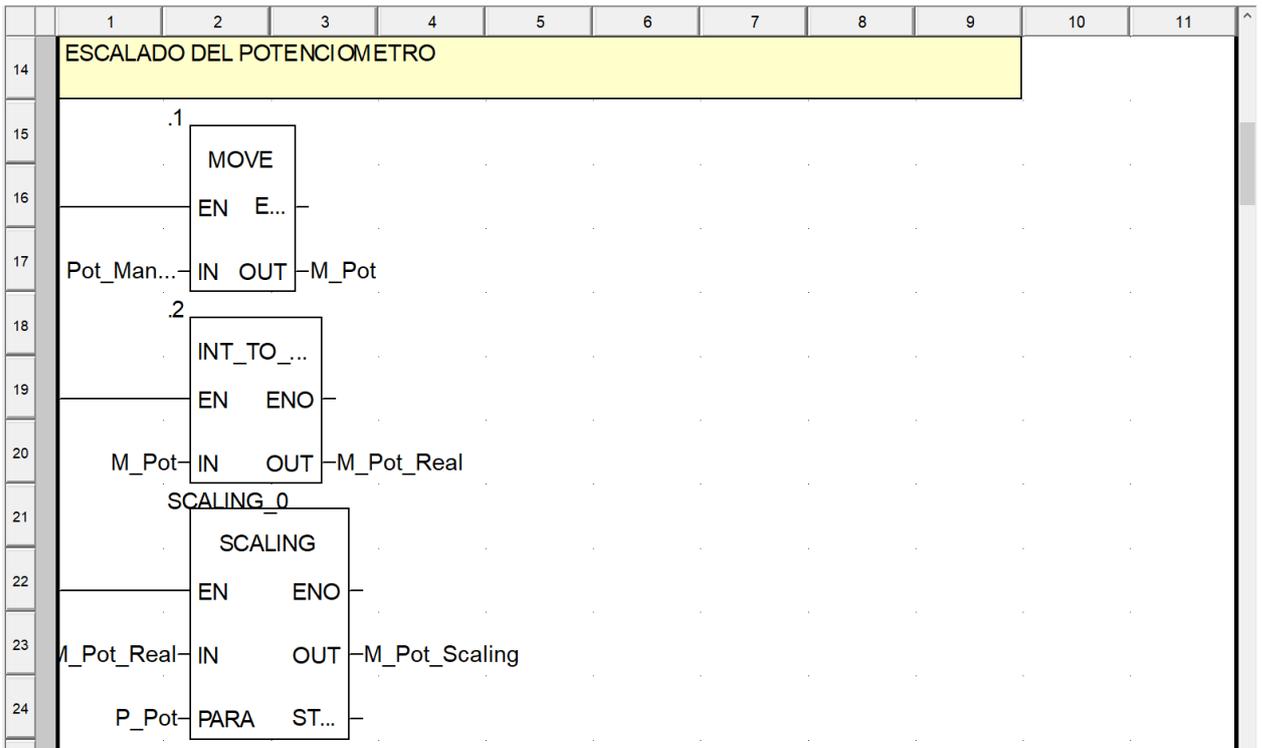


Figura 65: Programa PLC.

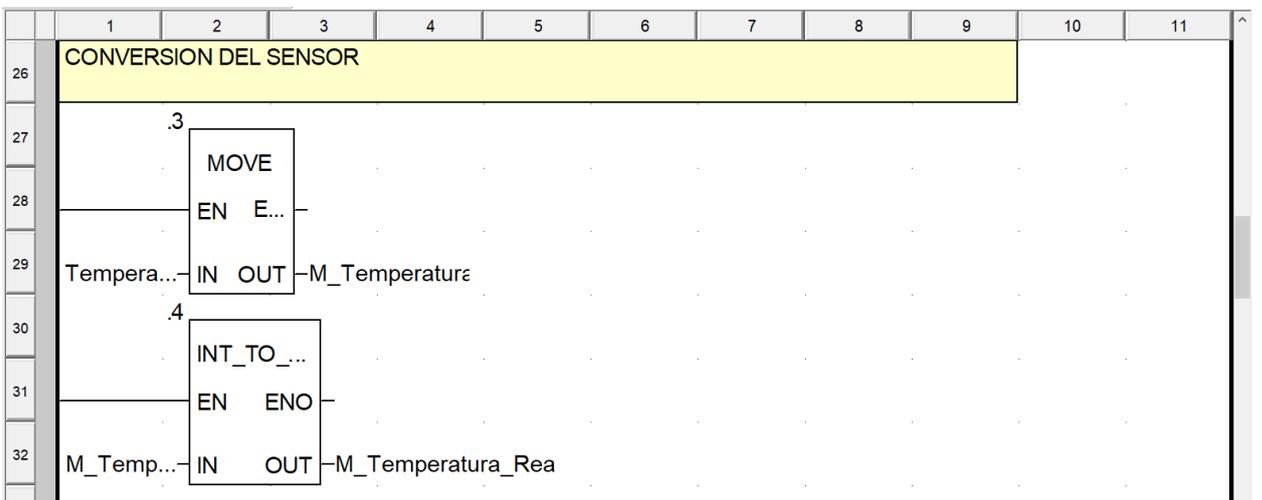


Figura 66: Programa PLC.

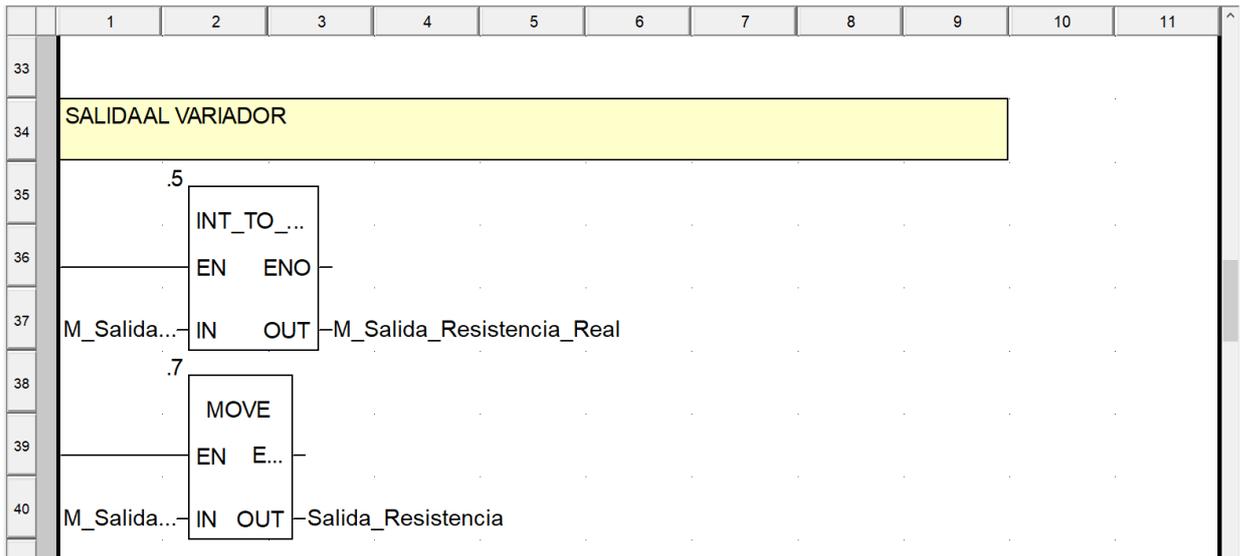


Figura 67: Programa PLC.

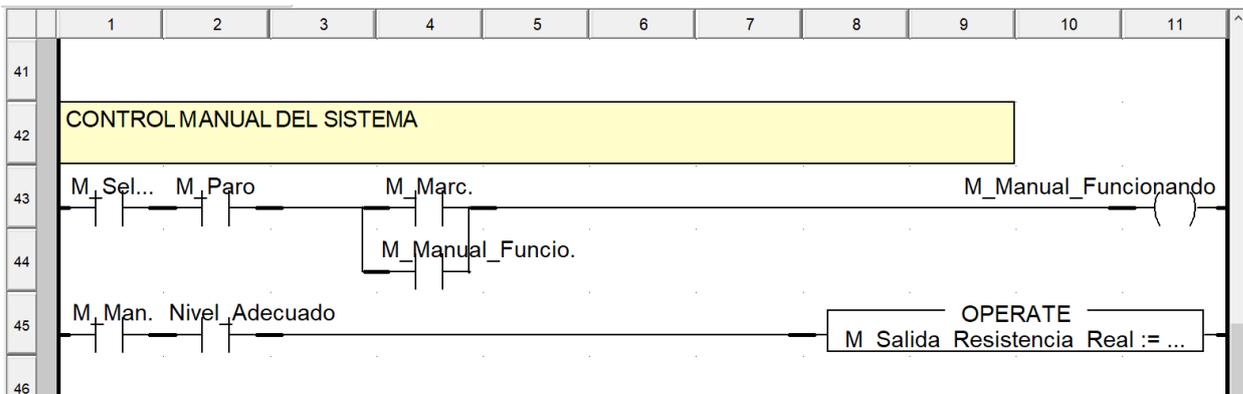


Figura 68: Programa PLC.

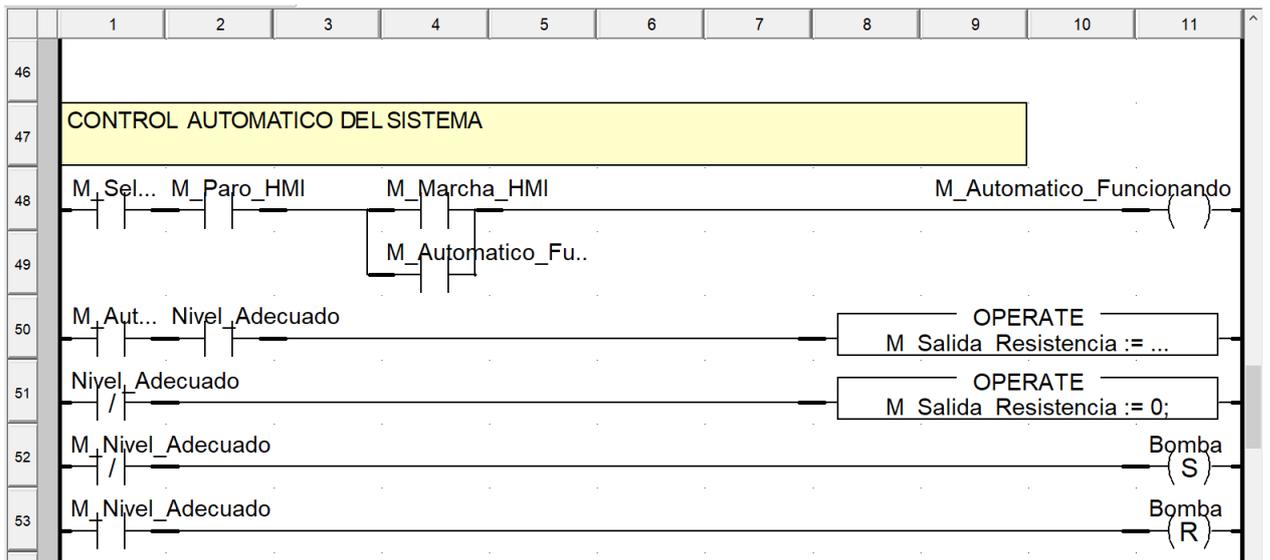


Figura 69: Programa PLC.

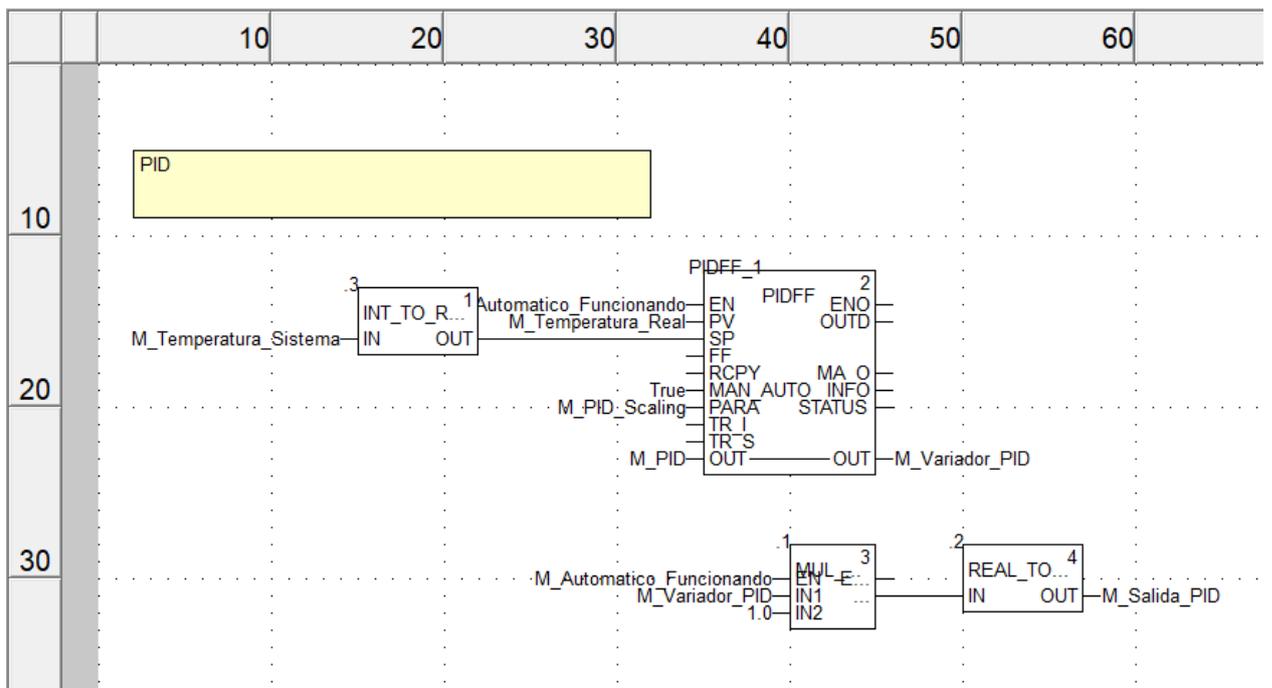


Figura 70: Programa PLC.

3.10. Programación HMI

El HMI local es el medio que nos permite ejecutar control y supervisión de la planta de manera inmediata y siempre se encuentra activo. Este HMI presenta funciones de supervisión solamente, así como también nos permite realizar modificaciones de control de mando en el proceso y los parámetros de control del controlador PID.

Debido a restricciones de los componentes del sistema, el escalamiento de nuestras señales está limitado a un rango de 15 A 35°. Por lo tanto, si es que en algún momento el usuario ingresa valores menores o mayores a este rango, el programa automáticamente lo rectificará hacia el valor permisible más cercano.

3.10.1. Panel para TPC del Módulo de Temperatura

Aquí se puede observar las alarmas de nivel adecuado que es cuando el tanque ya está lo suficientemente lleno para poder encender las resistencias calefactoras, el tipo de control (Local o Remoto) y un indicador de sistema funcionando. También se puede configurar el valor del Setpoint y de los parámetros PID.

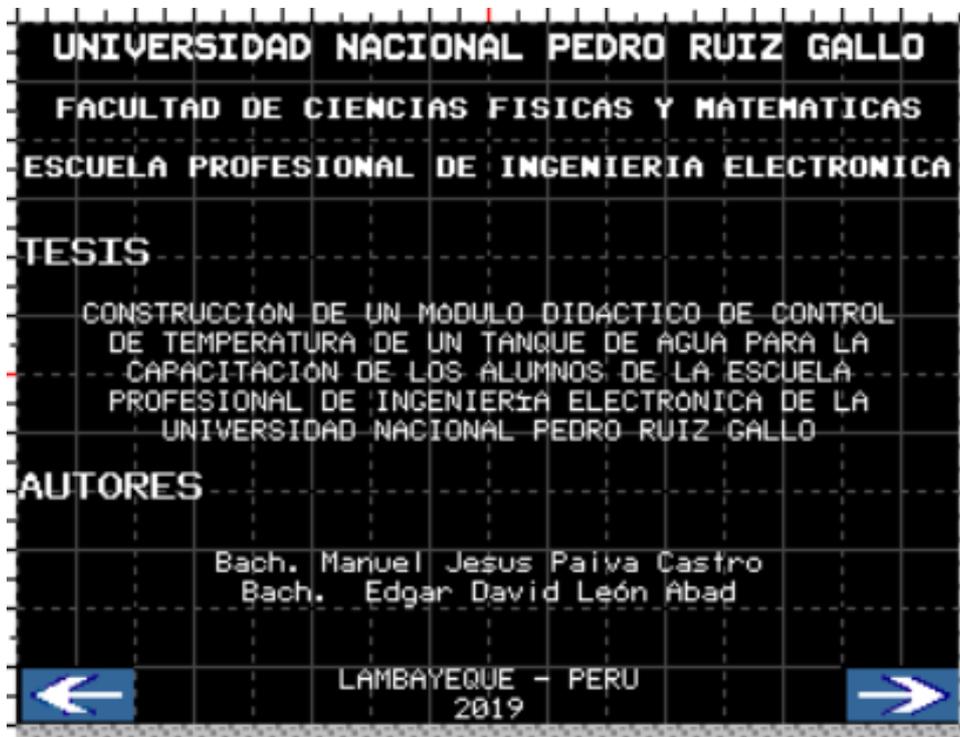


Figura 71: Panel bienvenida HMI.

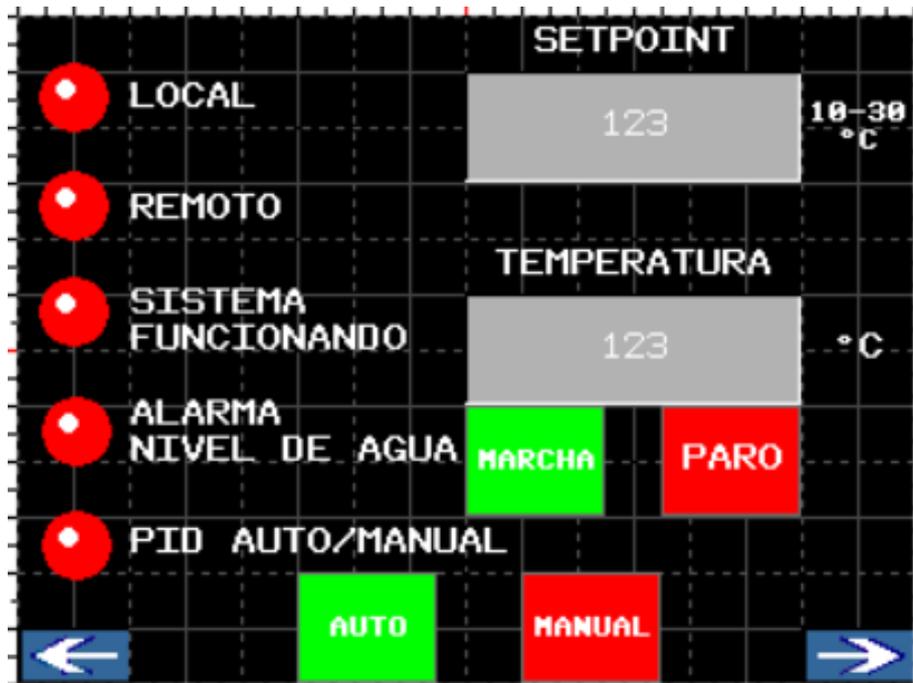


Figura 72: Pantalla principal HMI.

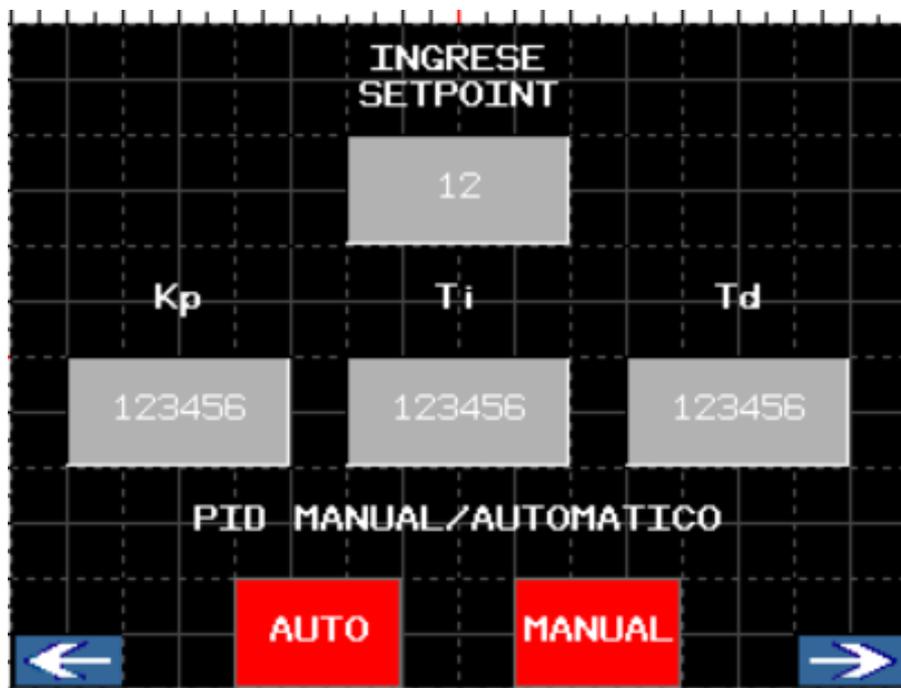


Figura 73: Pantalla control HMI.

3.11. Presupuesto

3.11.1. Costos de Hardware

Tabla 7: Costos de Hardware.

ACCESORIOS	CANTIDAD	PRECIO
Sensor de Temperatura PT100	2	S/. 80.00
Acondicionador de potencia	1	S/. 214.30
Electrobomba	1	S/. 50.00
CPU BMX P34 2020	1	S/. 2 434.30
BMX AMM 0600	1	S/. 1 740.57
BMX DDM 3202K	1	S/. 1 071.28
BMX CPS 3500	1	S/. 2 584.88
Rollo 100m de cable INDECO	1	S/. 169.90
Interruptor Schneider Bipolar	1	S/. 95
Otros (Riel, Canaletas, Tornillos, etc.)	1	S/. 100
	TOTAL	S/. 8 540.23

3.11.2. Costos de Software

No se consideran costos de Software dado que la escuela profesional de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo cuenta con ambos softwares usados para el diseño del módulo.

Tabla 8: Costos de Software.

PROGRAMA	CANTIDAD	PRECIO
Unity PRO	1	S/. 0
Vijeo Designer	1	S/. 0
	TOTAL	S/. 0

3.11.3. Costos totales

Tabla 9: Costos totales.

DESCRIPCIÓN	PRECIO TOTAL
Costo de Hardware	S/. 8 540.23
Costo de Software	S/. 0
Costo de Ingeniería	S/. 2 500.00
Costo de Instalación	S/. 1 000.00
Costo de Capacitación (8 horas)	S/. 500.00
TOTAL	S/. 12 540.23

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO IV

4.1. Conclusiones

- Se desarrolló satisfactoriamente el módulo de proceso de un sistema de control de temperatura de un tanque de agua.
- Se seleccionó correctamente el sensor de temperatura, sensor capacitivo de nivel y resistencia calefactora necesaria para el sistema.
- Se seleccionó con éxito el circuito de potencia de la resistencia calefactora mediante una salida analógica del PLC del módulo didáctico de control de temperatura de un tanque de agua.
- Se obtuvo correctamente el modelo matemático aproximado del sistema en base a su curva de respuesta. Esto permitió identificar el comportamiento del sistema como uno de primer orden. Además, se validó el modelo obtenido haciendo uso del software Matlab.

4.2. Recomendaciones

- Para obtener una respuesta adecuada del sistema es necesario que durante las pruebas se mantenga en mezcla constante el agua del tanque del módulo.
- Al momento de realizar las medidas de temperatura en el módulo, es recomendable utilizar un termómetro digital para verificar que las lecturas que se muestran en el PLC sean correctas.
- Se recomienda realizar una limpieza periódica del módulo a fin de evitar suciedad, hongos y obstrucciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPITULO V

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrew, W. (2002). *Instrumentación Aplicada en los Procesos Industriales*. Editorial L&M.
- C., E. V. (s.f.). *Actuadores*.
- Carlos A. Smith, & Armando B. Corripio. (1991). *Control Automático de Procesos*. Editorial Limusa.
- Crespo, W. (09 de Febrero de 2011). *automatizacionindustrial*. Obtenido de automatizacionindustrial:
<https://automatizacionindustrial.wordpress.com/2011/02/09/queeslaautomatizacionindustrial/>
- García, R. P., Reinoso García, O., García Aracil, N., & Aracil Santonja, R. (2003). *Apuntes de Sistemas de Control*. Alicante: Editorial Club Universitario.
- Laura Vanessa Arenas Montaña, Arturo José Castilla De Cuba, & Danilo Alfonso Rojas Méndez. (s.f.). *Interfaz Hombre Maquina*.
- MATLAB - MathWorks. (s.f.). *MATLAB*. Obtenido de MATLAB : MATLAB
- Miguel. (11 de Marzo de 2015). *Control Real Español*. Obtenido de Control Real Español:
<http://controlreal.com/es/controlador-logico-programable-plc/>
- Novelo, D. A. (11 de Febrero de 2013). Obtención de la Función de Transferencia de Sistemas mediante la Identificación Paramétrica a partir de datos Experimentales. *INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MÉRIDA*, 2-9.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A.
- Repositorio digital de tesis PUCP*. (12 de Mayo de 2017). Obtenido de Repositorio digital de tesis PUCP: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/8629>
- Researchgate*. (15 de Julio de 2015). Obtenido de Researchgate:
https://www.researchgate.net/publication/45228880_Disenio_y_construccion_de_un_modulo_didactico_de_control_de_flujo
- S.A.C, H. I. (2017). LISTA DE PRECIOS PENTAX 2017. *HIDROMEC INGENIEROS S.A.C*, 48.
- Sánchez, J. A. (2003). *Control Avanzado de Procesos*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Universidad Salesiana Ecuador Repositorio Digital*. (2011). Obtenido de Universidad Salesiana Ecuador Repositorio Digital : <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1679>
- Villajulca, J. C. (22 de Septiembre de 2012). *Instrumentacion y Control.net*. Obtenido de Instrumentacion y Control.net: <http://instrumentacionycontrol.net/configuraciones-de-plc-compactos-y-modulares/>
- WisGEEK community*. (s.f.). Obtenido de WisGEEK community:
<http://www.wisgeek.com/what-is-human-machine-interface.htm>