

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO
PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Yossi Giovanni Fuertes Paucar

ASESOR: Ph.D., Ing. Julio César Tafur Sotelo

Lima, abril del 2017

RESUMEN

En el mercado industrial actual existe una alta competitividad por elevar la productividad y la calidad de su producto final. Por estos motivos, se encuentra en una constante búsqueda por mejorar el control de sus procesos y para ello requiere de profesionales que se encuentren mejor capacitados en temas relacionados a la instrumentación y el control de procesos.

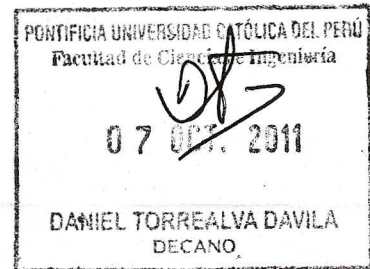
Debido a esta necesidad, existen diversas empresas que fabrican módulos didácticos que permiten desarrollar las experiencias de control requeridas para ser competitivo dentro del ámbito industrial actual. Sin embargo, la mayoría de instituciones educativas no cuentan con los recursos económicos suficientes para la adquisición de uno de estos módulos debido al alto costo de inversión que esto significa.

Por ello, 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 funcionabilidad 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 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 del comportamiento de las variables del sistema y modificar de manera sencilla los parámetros del controlador que tienen una relación directa con la respuesta.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e implementación de un módulo educativo para el control de temperatura.
Área : Control y Automatización # 942
Asesor : Julio Tafur Sotelo
Alumno : Yossi Giovanni Fuertes Paucar
Código : 2006.0391.1
Fecha : 05 de Octubre del 2011



Descripción y Objetivos

La creciente competitividad del mercado industrial actual hace necesario que los profesionales de hoy en día se encuentren más capacitados en temas relacionados a la instrumentación y al control de procesos. Esto es requerido con el fin de que se puedan desenvolver adecuadamente en la industria moderna, pudiendo controlar adecuadamente un determinado proceso, al conocer el manejo de los equipos involucrados en él.

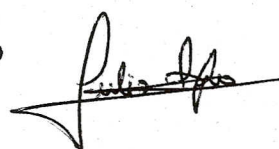

Los módulos educativos de control de procesos surgen como una alternativa para complementar los conocimientos teóricos y poder obtener la experiencia necesaria para ser competitivo dentro del ámbito industrial. Estos módulos poseen las características de los sistemas que se encuentran con mayor frecuencia en la industria de procesos, tales como flujo, nivel, presión y temperatura.

Por ello, el objetivo de desarrollar este proyecto es implementar un sistema de control de temperatura, adicionando un lazo de control al módulo educativo control de nivel que se encuentra actualmente en las instalaciones del CETAM. Este sistema permitirá adquirir conocimientos en la dinámica del proceso de temperatura.

El diseño y la implementación del sistema de control propuesto involucra la obtención del modelo matemático de la planta, el desarrollo de la interfaz de usuario en base al software LabVIEW, la realización de los circuitos de acondicionamiento de señal necesarios para sensores y actuadores; y la instalación de los componentes mecánico eléctricos. Además se desarrollará este sistema utilizando conceptos de control digital implementando el algoritmo de control PID por ser altamente usado en la mayoría de sistemas de control industrial.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

V^oB^o  

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e implementación de un módulo educativo para el control de temperatura.

Índice

Introducción

1. Problemática en la adquisición de módulos educativos.
2. Módulos educativos de control de procesos en la actualidad.
3. Diseño del módulo educativo para el control de temperatura.
4. Implementación del sistema mecánico-eléctrico.
5. Pruebas y Resultados.

Conclusiones

Recomendaciones

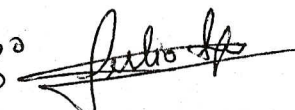

Bibliografía

Anexos

Máximo: 50 páginas

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

VºBº 


MÁXIMO 50 PÁGINAS



La presente Tesis está dedicada a Dios, por darme salud y bienestar para culminar mi carrera. A mis padres, por todo el apoyo y consejos que me dieron a lo largo de esta etapa de mi vida. A mi hermana, por sus palabras de aliento para alcanzar este objetivo. A mi familia, por su respaldo en cada decisión de mi vida profesional. A mis profesores, por su orientación y paciencia. Y a todas las personas de la universidad que hicieron posible la realización de este proyecto.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. PROBLEMÁTICA EN LA ADQUISICIÓN DE MÓDULOS EDUCATIVOS	3
1.1. Módulos educativos de control de procesos.....	3
1.2. Declaración del marco problemático.....	3
2. MÓDULOS EDUCATIVOS DE CONTROL DE PROCESOS EN LA ACTUALIDAD	5
2.1. Estado del arte.....	5
2.1.1. Módulos educativos comerciales.....	6
2.1.2. Módulos educativos desarrollados en proyectos de ingeniería.....	8
2.2. Marco conceptual.....	9
3. DISEÑO DEL MÓDULO EDUCATIVO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA	11
3.1. Objetivos.....	11
3.1.1. Objetivo General.....	11
3.1.2. Objetivos Específicos.....	11
3.2. Módulo educativo para el control de nivel.....	11
3.3. Diseño del sistema de control de temperatura.....	12
3.4. Diseño de los componentes mecánicos para el control de temperatura....	14
3.4.1. Resistencia calefactora.....	14
3.4.2. Sensor de temperatura.....	15
3.4.3. Agitador.....	16
3.4.4. Tarjeta de adquisición de datos.....	18
3.5. Determinación del modelo matemático de la planta.....	20
3.5.1. Rango de linealidad de la planta.....	20
3.5.2. Obtención del modelo mediante la respuesta al escalón.....	21
3.6. Validación del modelo matemático.....	25
3.7. Diseño del algoritmo de control PID.....	26
3.8. Sintonización del controlador PID.....	28

4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO-ELÉCTRICO	32
4.1. Implementación del sistema eléctrico.....	32
4.1.1. Acondicionamiento para el sensor de temperatura.....	32
4.1.2. Acondicionamiento para el control de potencia de la resistencia calefactora.....	35
4.1.2.1. Detector de cruce por cero.....	36
4.1.2.2. Microcontrolador.....	38
4.1.2.3. Control de potencia.....	43
4.1.3. Acondicionamiento para el agitador.....	44
4.2. Implementación del sistema mecánico.....	45
4.3. Costos.....	48
5. PRUEBAS Y RESULTADOS	49
5.1. Pruebas en el circuito de acondicionamiento para el sensor de temperatura.....	49
5.2. Pruebas en el circuito de acondicionamiento para la resistencia calefactora.....	50
5.2.1. Pruebas en el detector de cruce por cero.....	51
5.2.2. Pruebas en la generación de la señal de activación del TRIAC.....	52
5.2.3. Pruebas en el circuito para el control de potencia.....	53
5.3. Pruebas en el circuito de activación del agitador.....	56
5.4. Pruebas de linealidad en la resistencia calefactora.....	57
5.5. Resultados del funcionamiento del controlador.....	58
5.6. Guía práctica para la elaboración de pruebas de control con el módulo de temperatura.....	61
5.6.1. Identificación de los equipos para el control de temperatura.....	61
5.6.2. Consideraciones iniciales y puesta en marcha del módulo.....	61
5.6.3. Determinación del rango lineal de proceso.....	62
5.6.4. Identificación del modelo matemático del proceso.....	62
5.6.5. Sintonización del controlador PID.....	63
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	65



INTRODUCCIÓN

El continuo desarrollo del mercado a nivel industrial da lugar a la búsqueda constante de la optimización de los procesos de producción. Por ello la industria actual requiere, cada vez con mayor importancia, de profesionales capacitados que puedan realizar adecuadamente el control de los diversos procesos de producción. Por este motivo, la enseñanza de temas relacionados a la instrumentación y al control de procesos requiere necesariamente de un trabajo tipo práctico que le permita al alumno adquirir conocimientos en el manejo y funcionamiento de los equipos que forman parte de un determinado proceso, brindándole una mejor visión de lo que se enseña en clases teóricas.

Debido a esta necesidad, en la actualidad existen diversas empresas que fabrican módulos didácticos en los cuales se desarrolla el control de los procesos que se encuentran con mayor frecuencia en las industrias para un mejor aprendizaje de su comportamiento. Sin embargo, son varias las instituciones educativas que no tienen los recursos suficientes para su adquisición debido al alto costo de inversión que esto implica.

En medio de esta situación surge la posibilidad de realizar, en un primer ensayo, la construcción de un sistema de bajo costo con equipos que se encuentran al alcance en el mercado nacional. Este sistema serviría como primera etapa para la implementación de un prototipo de un módulo educativo de control de procesos. Con el apoyo del Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM) se viene implementando uno de estos sistemas, el cual presenta hasta el momento las características para realizar un control de nivel.

El presente trabajo de tesis tiene como finalidad adicionarle un lazo de control de temperatura al equipo control de nivel que se encuentra actualmente en las instalaciones del CETAM. De esta manera se podrá adquirir conocimientos y experiencia en la dinámica del proceso de temperatura.

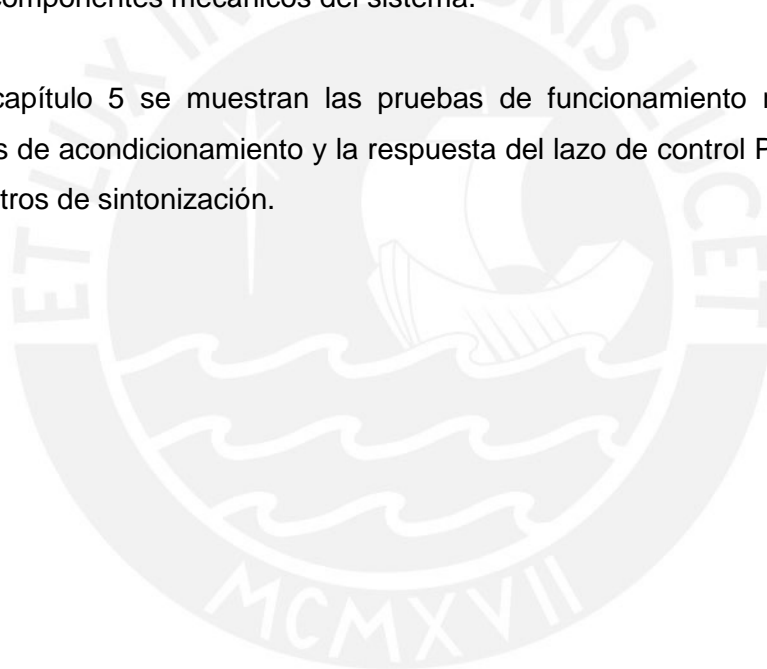
En el capítulo 1 se explica la importancia del uso de módulos educativos de control de procesos y el contexto del marco problemático por el cual la mayoría de instituciones educativas no cuentan con estos sistemas para realizar pruebas de laboratorio.

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte con las tecnologías que existen actualmente para módulos de control de procesos que son comercializados y otros que han sido desarrollados como proyectos de ingeniería.

En el capítulo 3 se desarrolla el diseño del lazo de control de temperatura para el equipo control de nivel que actualmente se encuentra en las instalaciones del CETAM. Este diseño incluye el diagrama de proceso, el dimensionamiento y selección de sensores y actuadores, el modelo matemático del sistema y el desarrollo del algoritmo de control PID.

En el capítulo 4 se describe el proceso de implementación de los circuitos de acondicionamiento para los sensores y actuadores. Se presenta además el montaje de los componentes mecánicos del sistema.

En el capítulo 5 se muestran las pruebas de funcionamiento realizadas en los circuitos de acondicionamiento y la respuesta del lazo de control PID con diferentes parámetros de sintonización.



CAPÍTULO 1

1. PROBLEMÁTICA EN LA ADQUISICIÓN DE MÓDULOS EDUCATIVOS

En este capítulo se presenta una explicación general de la importancia que representa el uso de módulos educativos para las instituciones que se dedican a la enseñanza de temas relacionados al campo de control e instrumentación. Asimismo, se describen algunos factores negativos involucrados con su adquisición a una empresa fabricante.

1.1. Módulos educativos de control de procesos

Actualmente las empresas pertenecientes al rubro industrial se encuentran en constante competencia por mejorar la calidad de sus diversos procesos. Para esto las industrias requieren que el control de sus procesos sea el óptimo y por ende necesitan de profesionales que se encuentren mejor capacitados en temas relacionados al control e instrumentación.

Por este motivo existen varias empresas que fabrican módulos didácticos, los cuales poseen las características de los sistemas que se encuentran con mayor frecuencia en la industria de procesos, tales como el control de flujo, nivel, presión, temperatura, etc. Estos módulos permiten complementar los conocimientos teóricos y obtener la experiencia requerida para ser un profesional competitivo dentro del mercado industrial actual. Asimismo, permiten que el estudiante se familiarice con el manejo de equipos que son utilizados con frecuencia en las industrias.

1.2. Declaración del marco problemático

El avance que se ha ido desarrollando en el campo del control de procesos se debe a la necesidad de las empresas por controlar los procesos que llevan a cabo para incrementar la producción y la calidad del producto final. Por ello se requiere que los profesionales se encuentren altamente capacitados con los equipos y procesos que se pueden encontrar con mayor frecuencia en las industrias.

La mayoría de instituciones no complementan los conocimientos teóricos impartidos con prácticas de laboratorio que permitan obtener experiencia en el campo del control de procesos. Esto se debe principalmente a la falta de recursos económicos, ya que la adquisición de un módulo educativo implica una inversión

considerablemente alta. No sólo por el elevado precio de los módulos, sino por la capacitación que se requiere brindar al personal para el funcionamiento y mantenimiento de estos equipos.

El diseño e implementación de este tipo de sistemas resulta conveniente para muchas entidades educativas, puesto que a pesar de no contar con un algoritmo de control complejo, es suficiente para aplicaciones educativas donde se busca brindar una visión general acerca del estado actual de la industria. Además el desarrollo de la interfaz de usuario mediante un software comercial y abierto reduce el costo de inversión al reducir los gastos por capacitación del personal y mantenimiento.



CAPÍTULO 2

MÓDULOS EDUCATIVOS DE CONTROL DE PROCESOS EN LA ACTUALIDAD

En este capítulo se presenta el estado del arte respecto a las tecnologías desarrolladas hasta el momento en el diseño de los módulos didácticos para el control de procesos. Además, se definen algunos conceptos importantes que facilitarán la comprensión del funcionamiento de estos módulos.

2.1. Estado del arte

En la actualidad, el mercado industrial requiere que sus procesos sean controlados y monitoreados adecuadamente. Para ello es necesario que los profesionales de hoy en día se encuentren mejor capacitados en los temas de instrumentación y control de procesos. Esto implica necesariamente que la enseñanza teórica de estos temas se complemente con prácticas de laboratorio que aporten una mayor visión de lo aprendido. Por esta razón existen diversas empresas que fabrican módulos educativos de control de procesos, que además de brindar los conocimientos prácticos, permiten obtener experiencia en el manejo de equipos industriales.

El avance que se viene desarrollando en el campo de los módulos didácticos ha permitido que cada vez tengan mayores funcionalidades, por lo que se incrementa el costo de su adquisición. Esto significa un inconveniente para las instituciones educativas que no disponen de grandes recursos, por eso para algunas de ellas es más factible la implementación de uno de estos módulos con las características básicas para cumplir con su finalidad.

El presente estudio muestra el avance logrado en el campo de los módulos educativos control de procesos. En primer lugar se presentan los módulos que son fabricados por empresas y se enumeran sus características y funcionalidades principales. Posteriormente, se muestran algunos de proyectos en ingeniería que se han desarrollado con la finalidad de obtener conocimientos prácticos en temas relacionados al control de procesos.

2.1.1. Módulos educativos comerciales

Entrenador básico sobre control de procesos 37-100

Fabricante: Tecnoedu

Es un módulo didáctico para el control de temperatura. Utiliza un controlador ON/OFF que opera cuando la temperatura se sale de una banda predeterminada de valores de umbral. Además, posee una entrada adicional que permite introducir perturbaciones al sistema [1].

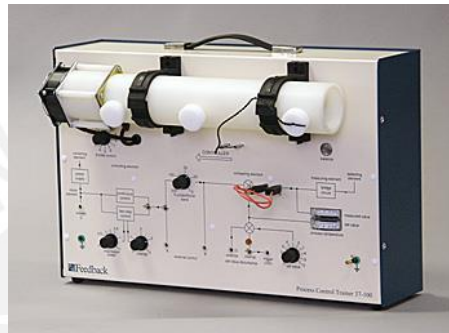


Figura 2.1. Módulo para el control de temperatura 37-100

Unidad control de nivel RT 614

Fabricante: US Didactic

Es un equipo diseñado con el propósito de que el alumno pueda interactuar con los sistemas de control automático de nivel. La instrumentación que utiliza es de tipo industrial e incluye un controlador lógico programable [2].



Figura 2.2. Unidad para el control de presión RT 614

Unidad de control de procesos para estudio de presión de aire UCP-P

Fabricante: Edibon

Es una unidad diseñada para el estudio del control de presión mediante un lazo PID. Utiliza una tarjeta de adquisición de datos para realizar el control desde un computador por medio de una interfaz de usuario creada por el fabricante que ayuda a obtener una visualización gráfica de la variable de proceso [3].

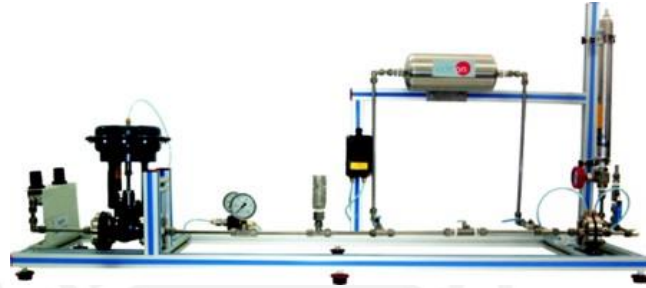


Figura 2.3. Unidad para el control de presión UCP-P

Unidad de entrenamiento para el control de flujo PRC100

Fabricante: hft EDUCATION

Es un equipo de entrenamiento que utiliza un circuito cerrado de agua o aire comprimido para simular el control de flujo de gases o líquidos. Utiliza un controlador PID, una bomba centrífuga, un transmisor de presión diferencial, una válvula neumática y un sistema SCADA para la supervisión en la computadora [4].



Figura 2.4. Unidad de entrenamiento para el control de flujo PRC100

2.1.2. Módulos educativos desarrollados en proyectos de ingeniería

Módulo didáctico de control de nivel para laboratorio de automatización

Es un sistema que permite aprender y realizar prácticas de control y medición de nivel de líquido. Utiliza un transmisor de nivel ultrasónico, un variador de frecuencia, una válvula solenoide y un PLC [5].



Figura 2.5. Módulo didáctico de control de nivel

Módulo didáctico para control y monitoreo de 3 variables nivel, temperatura, presión

Es un equipo de entrenamiento en el cuál se puede realizar prácticas orientadas a la instrumentación, automatización, control automático, etc. Utiliza un PLC Flex Logix 5433, un variador de velocidad, transmisores de presión y transmisores de temperatura [6].



Figura 2.6. Módulo didáctico para control y monitoreo de 3 variables

En general existen diferentes consideraciones que se deben tomar en cuenta al momento de realizar la compra o la implementación de un módulo educativo. Estas consideraciones, en su mayoría dependen del proceso a controlar y de sus funcionalidades, las cuales finalmente determinan la complejidad en las características del módulo. Por otro lado, los módulos que utilizan control por computadora tienen la ventaja de poseer una interfaz de usuario para el control y supervisión de datos sin costo adicional [7]. Sin embargo, sucede con frecuencia que el software que emplean no es comercial, por lo que es necesaria una capacitación previa para poder manejarlo y soporte continuo en caso de fallas.

2.2. Marco conceptual

- Módulo educativo control de procesos

Es un equipo didáctico desarrollado con equipamiento industrial que permite a los estudiantes explorar una amplia gama de temas de análisis en control de procesos industriales. Por esta razón, están diseñados para que el usuario varíe las condiciones del proceso y experimente los resultados [5].

- Sistema de control

Un sistema de control es una interconexión de componentes que forman una configuración del sistema que proporcionará una respuesta deseada. Un sistema de control responde a la señal de entrada y de acuerdo a ésta, cambia la señal de salida [8]. Los sistemas de control se encuentran en gran cantidad en todos los sectores de la industria, tales como control de calidad de los productos manufacturados, líneas de ensamble automático, control de máquinas-herramienta, control por computadora, robótica y muchos otros [9].

- Sensor

Los sensores son los elementos primarios de medición de variables del proceso, siendo algunos usados para lectura e indicación y otros para transformar la variable medida en una señal eléctrica, los más usados en la industria son los de nivel, de presión, de temperatura, de flujo, de proximidad entre otros. Esta señal va hacia la entrada del controlador para ser comparada con el valor de referencia o "set point" determinando el error y la acción de control [10].

- Controlador

El controlador es un instrumento para detectar los desvíos existentes entre el valor medido por un sensor y el valor deseado o “set point”, programado por un operador; emitiendo una señal de corrección hacia el actuador. Los controladores pueden ser del tipo: manual, neumático o digitales; así como las computadoras con tarjetas de adquisición de datos y los PLC (Controladores Lógicos Programables) [10].

- Actuador

Los actuadores son los elementos finales de control, que tienen por función alterar el valor de la variable manipulada con el fin de corregir o limitar la desviación del valor controlado respecto al valor deseado. Los fabricantes actualmente proveen una serie de actuadores como: motores, válvulas, relés y elementos calefactores [10].

- Algoritmo de control

Es un conjunto de instrucciones bien definidas, ordenadas y finitas que permite realizar una actividad de control mediante pasos sucesivos que no generen dudas a quien deba realizar dicha actividad. Dados un estado inicial y una entrada, siguiendo los pasos sucesivos se llega a un estado final y se obtiene una solución [9].

- Interfaz de usuario

La interfaz de usuario está constituida por una serie de dispositivos, tanto físicos como lógicos, que permiten al hombre interactuar de una manera precisa y concreta con un sistema [11].

- Software para desarrollo

Es un software que le permite al usuario una visualización gráfica de las variables involucradas en el control de un proceso. Además, le permite modificar los parámetros de control durante el desarrollo del proceso a fin de obtener una respuesta deseada.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL MÓDULO EDUCATIVO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA

En este capítulo se realiza un análisis del equipo control de nivel que se encuentra en las instalaciones del CETAM para adicionarle un sistema que permita el control de temperatura. Se presenta además el dimensionamiento y la selección de los componentes que conforman este sistema. Luego de ser definidos se obtiene el modelo matemático de la planta y se desarrolla el algoritmo de control.

3.1. Objetivos

3.1.1. Objetivo General

- Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura adicionando un lazo de control al equipo control de nivel que se encuentra en las instalaciones del CETAM.

3.1.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar el diagrama de proceso e instrumentación (P&ID).
- Seleccionar adecuadamente los sensores y actuadores.
- Diseñar e implementar los circuitos de acondicionamiento para los sensores y actuadores.
- Obtener el modelo matemático de la planta.
- Implementar un algoritmo de control PID.
- Desarrollar la interfaz de usuario mediante el software LabVIEW.

3.2. Equipo control de nivel

Uno de los equipos didácticos con los que cuenta el CETAM es el sistema de control de nivel que fue desarrollado durante un anterior proyecto de tesis [12]. Este se muestra en la Figura 3.1 y permite llevar a cabo pruebas de control utilizando una bomba, una electroválvula y un sensor de presión diferencial para controlar el nivel de agua dentro de un tanque de acrílico. En la Figura 3.2 se muestra su diagrama de instrumentación.



Figura 3.1. Equipo control de nivel

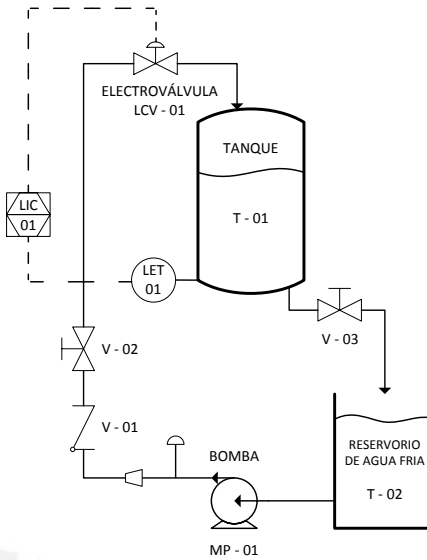


Figura 3.2. Diagrama P&ID del módulo control de nivel

3.3. Diseño del sistema de control de temperatura

El diseño que se desarrolló para obtener un control de temperatura en el módulo se muestra en color rojo en el diagrama de instrumentación de la Figura 3.3.

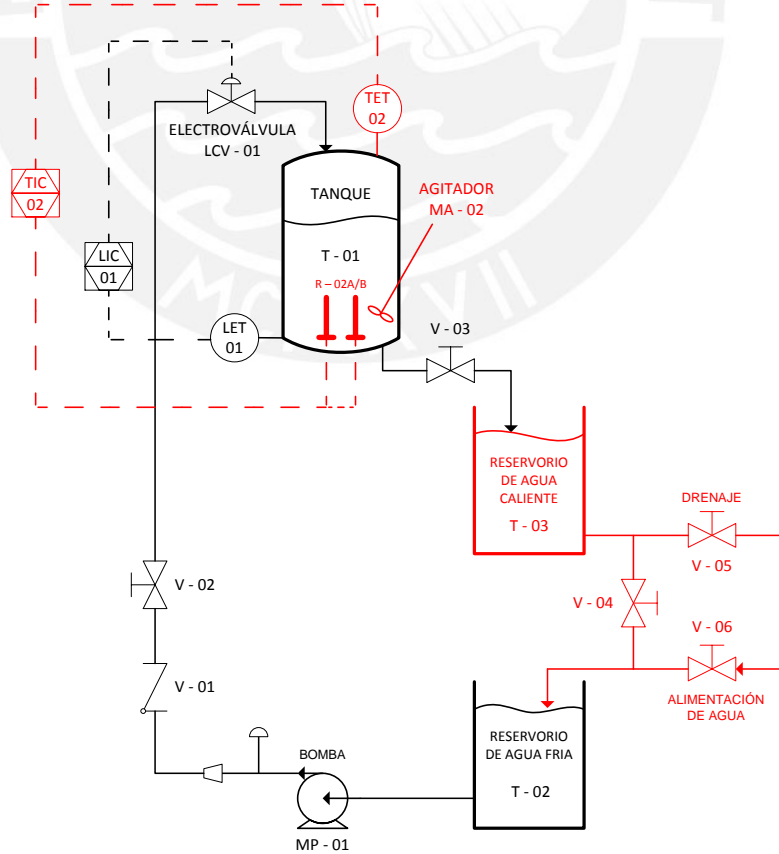


Figura 3.3. Diagrama P&ID del sistema de control de temperatura

El control de temperatura se realiza dentro del tanque con agua T-01. Dado que el sistema no cuenta con un equipo que enfríe el agua como por ejemplo un intercambiador de calor o celdas peltier, se utiliza el ingreso constante de agua fría al sistema como elemento enfriador. Sin embargo, para mantener la estabilidad en el sistema es necesario tener un nivel constante de agua dentro del tanque T-01, ya que de lo contrario la masa de agua a calentar sería variable y en consecuencia el modelo matemático de la planta también lo sería. Este nivel se consigue fijando en una determinada posición la válvula manual de descarga V-03 y fijando un voltaje en la electroválvula LCV-01 de tal manera que el flujo de entrada de agua sea siempre igual al flujo de salida de agua.

Las resistencias calefactoras R-02A y R-02B se accionan en paralelo y proveen el flujo de calor de entrada al sistema, mientras que la salida de agua caliente del tanque representa el flujo de calor de salida. Si ambos flujos de calor son equivalentes, se consigue mantener una temperatura constante; la cual permanece uniforme dentro del tanque por la mezcla que produce el agitador MA-02. Los tanques T-02 y T-03 funcionan como depósitos para el agua fría y caliente respectivamente.

Análogamente a la planta de nivel, se utiliza una estrategia de control de lazo por realimentación para que la señal de temperatura pueda seguir sin problemas una referencia y se recupere frente a perturbaciones. En el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 3.4 se puede observar que el sensor toma datos de la temperatura del agua y los envía a la computadora mediante una tarjeta de adquisición de datos que se encarga de digitalizar la lectura. La computadora compara esta lectura con el nivel de temperatura deseado y envía una señal análoga a través de la tarjeta de adquisición de datos para la activación de las resistencias calefactoras. De esta manera se consigue controlar la temperatura en el tanque.

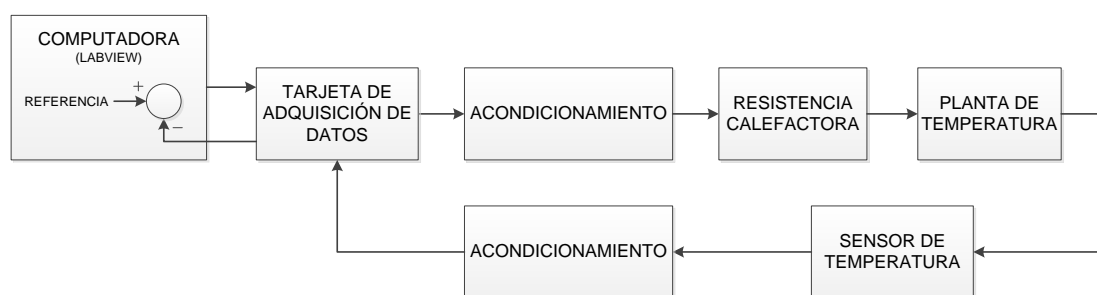


Figura 3.4. Diagrama de bloques del sistema

3.4. Diseño de los componentes mecánicos para el control de temperatura

3.4.1. Resistencia calefactora

En todo sistema de control de temperatura es necesario el uso de algún dispositivo que haga posible la transferencia de calor. Para la implementación de este sistema en el módulo educativo se utilizó una resistencia calefactora de inmersión debido a su bajo costo, facilidad de instalación y mantenimiento.

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 [13]:

$$Q_{resistencia} = M * Cp * \Delta T \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{resistencia} = \frac{Q_{resistencia}}{t_{límite}} = \frac{M * Cp * \Delta T}{t_{límite}} = \frac{V * \rho * Cp * \Delta T}{t_{límite}} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{resistencia} = \frac{0.015 * 998.29 * 4.182 * 10}{180} = 3.48 \text{ KW} \quad (3)$$

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 3.5. Resistencia calefactora de 2 KW

3.4.2. Sensor de temperatura

Dado que en el módulo educativo se requiere tener control sobre la temperatura, es indispensable hacer uso de un sensor que nos permita conocer su valor, el cual es enviado a la computadora para obtener la señal de control que permitirá regular la temperatura en el módulo.

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 identificaron los siguientes sensores [14]:

Tipo de sensor	Rango de medición	Precisión	Otras características	Costo	Foto
Termocupla tipo K	0°C a 277°C	0.5°C	Sumergible en agua. No lineal.	\$60.00	
RTD (Pt100)	-100°C a 200°C	0.1°C	Sumergible en agua. No lineal.	\$75.00	
LM35	-55°C a 150°C	0.5°C	No sumergible en agua. Lineal +10mV/°C	\$4.00	
LM335	-40°C a 100°C	1°C	No sumergible en agua. Lineal +10mV/°K	\$4.00	

Tabla 3.1. Cuadro comparativo de sensores de temperatura

Se seleccionó el sensor de temperatura LM35 ya que posee la característica de ser lineal por lo que no necesita ningún circuito de acondicionamiento para este propósito, a diferencia del detector resistivo de temperatura (RTD) y la termocupla tipo K. Además, es más económico en comparación a estos últimos y tiene una mayor precisión que su similar LM335.

Sin embargo, no es posible sumergirlo directamente en agua debido a que sus pines de conexión se encuentran expuestos. Por esto se le implementó una cubierta con un metal de cobre plateado (conductor de temperatura) y se aisló sus terminales con silicona. En la Figura 3.6 se puede apreciar este sensor y la cubierta implementada.



Figura 3.6. Sensor de temperatura LM35 y su cubierta implementada

3.4.3. Agitador

Uno de los efectos que se presentan en los sistemas con transferencia de calor en líquidos, es la variación de temperatura en diferentes zonas de la masa total del líquido. Esto ocasiona que el sensor no obtenga la lectura correcta del líquido. Por tanto, es necesario el uso de algún elemento que mantenga la temperatura uniforme en toda la masa del líquido. En este caso, se implementó e instaló un agitador para homogenizar la temperatura del agua dentro del tanque.

En el mercado se encuentran agitadores que se utilizan en aplicaciones industriales y que por tanto son diseñados para mezclar grandes cantidades de fluidos. Por ello, el costo de inversión que requieren es elevado. Estas características hacen que no sea adecuada la adquisición de un agitador del mercado para este módulo educativo. Por lo cual se realizó la construcción de un agitador utilizando un motor DC, un acople, una varilla de acero inoxidable y una paleta de palas planas como se muestra en la Figura 3.7.

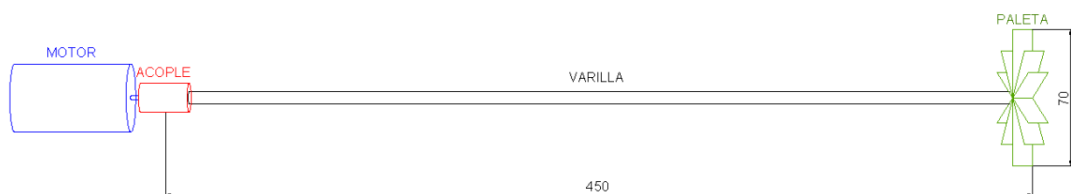


Figura 3.7. Diagrama del agitador

Para seleccionar adecuadamente el motor se consideró la potencia que requiere para realizar una correcta homogenización de la temperatura. Para ello primero se calculó el número de Reynolds (Re) en base a los siguientes parámetros:

- Densidad del agua a 20°C (ρ) = 998.29 Kg/m³
- Velocidad del agitador (N) = 480 RPM = 8 RPS
- Diámetro de la paleta (d) = 0.07 m
- Viscosidad dinámica del agua a 20 °C (μ) = 0.001003 Kg/m.s

Resolviendo en la ecuación:

$$\text{Número de Reynolds (Re)} = \frac{\rho * N * d^2}{\mu} \quad (4)$$

$$Re = \frac{998.29 * 8 * 0.07^2}{0.001003} = 39015.92$$

A continuación se determina el número de potencia (Ne) para sistemas con agitación [14] en base al valor de Re calculado y al tipo de turbina (paleta) axial.

Aproximando valores en la gráfica:

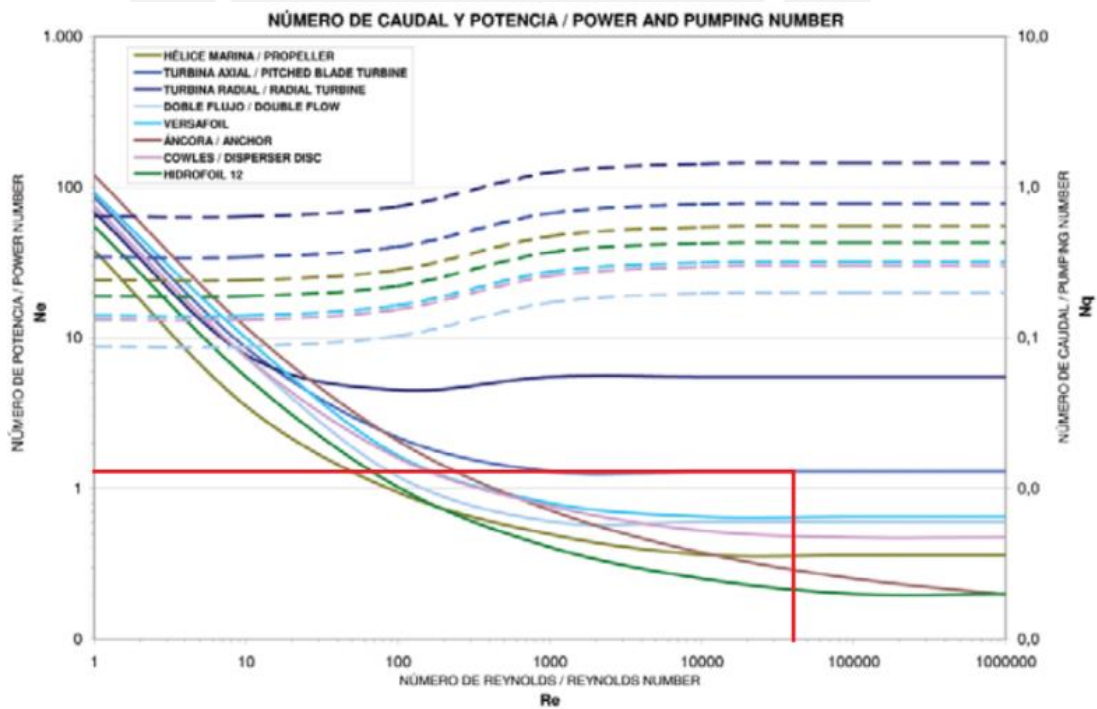


Figura 3.8. Curvas del número de Caudal y de Potencia

Se obtiene que el valor del número de potencia (N_e) es igual a 1.3.

Una vez obtenido este parámetro se reemplazaron valores en la ecuación 5 para determinar la potencia del motor del agitador [15]:

$$P = N_e * \rho * n^3 * d^5 \quad (5)$$

$$P = 1.3 * 998.29 * 8^3 * 0.07^5 = 1.12 \text{ W}$$

De esta ecuación se obtiene que la potencia que requiere el motor es de 1.12 W y por ello se utilizó un motor DC de 1.5 W y que trabaja a 5 VCC. Con esta potencia se asegura que el motor suministre el torque necesario para mantener una temperatura homogénea dentro del tanque.

3.4.4. Tarjeta de adquisición de datos

El equipo que se utiliza para realizar el control del sistema es una computadora, por lo que es necesario el uso de un dispositivo que permita enviar y recibir señales a través de ella. Este dispositivo debe ser de bajo costo y debe tener como mínimo 1 entrada analógica, 1 salida analógica y 1 salida digital. Adicionalmente, la resolución mínima para las señales analógicas debe ser 12 bits para garantizar una adecuada lectura de dichas señales.

En base a estos requerimientos se identificaron las siguientes tarjetas de adquisición de datos del fabricante National Instruments [17]:





Tipo de DAQ	Entradas analógicas / Resolución	Rango de voltaje de entrada	Salidas analógicas / Resolución	Rango de voltaje de salida	E/S Digitales	Costo	Foto
PCI-6010	16 / 16 bits	-5V a 5V	2 / 16 bits	-5V a 5V	6 DI 4 DO	\$620.00	
USB-6210	16 / 16 bits	-10V a 10V	-	-	4 DI 4 DO	\$930.00	
USB-6009	8 / 14 bits	-10V a 10V	2 / 12 bits	0V a 5V	12 DI / DO	\$530.00	
USB-6008	8 / 12 bits	-10V a 10V	2 / 12 bits	0V a 5V	12 DI / DO	\$360.00	

Tabla 3.2. Cuadro comparativo de tarjetas de adquisición de datos

Se utilizó la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) USB-6009, la cual es más económica comparada con los DAQs PCI-6010 y USB-6210 y además presenta una mayor resolución en el canal de entrada analógico comparada con su similar USB-6008. Adicionalmente, es compatible con el software de desarrollo LabVIEW del mismo fabricante. En la Figura 3.9 se muestra una imagen del DAQ utilizado, el cual fue proporcionado por el Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura (CETAM).



Figura 3.9. Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009

Las conexiones de las señales eléctricas que se implementaron en el DAQ se pueden apreciar en la Figura 3.10.

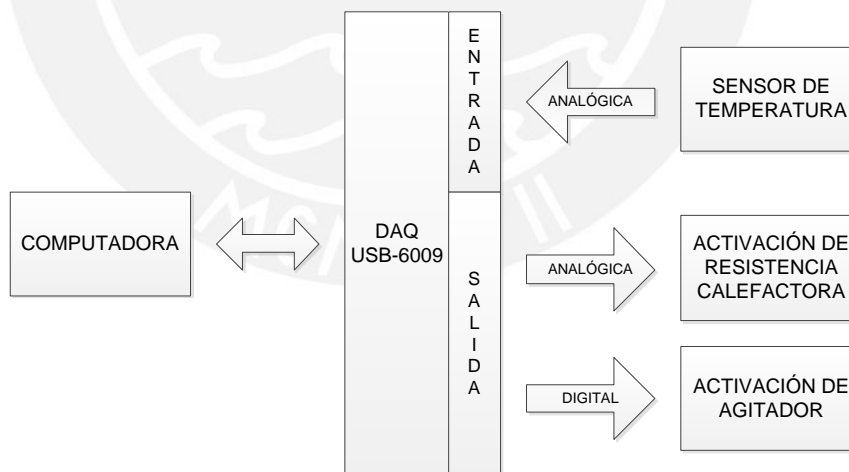


Figura 3.10. Distribución de las señales de entrada y salida para el control de temperatura

3.5. Determinación del modelo matemático de la planta

3.5.1. Rango de linealidad de la planta

Manteniendo la planta en lazo abierto como se muestra en la Figura 3.11, se aplicaron diferentes porcentajes de potencia eléctrica en la resistencia, la cual es proporcional al flujo de calor de ingreso, y se midió el valor de la temperatura en estado estable. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3.3.

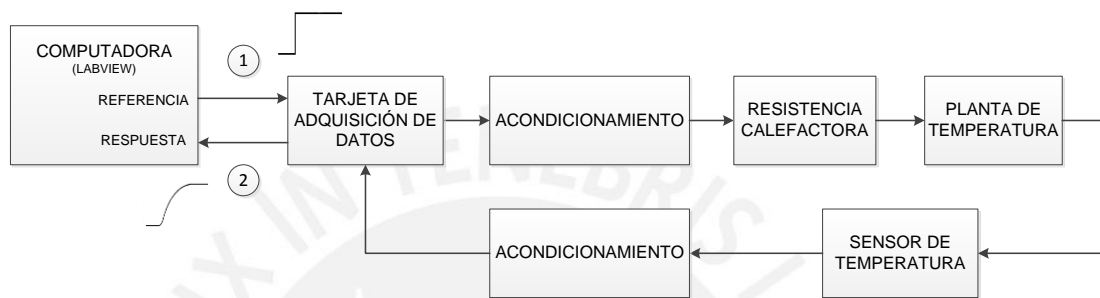


Figura 3.11. Análisis en lazo abierto de la planta

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

Tabla 3.3. Valores obtenidos en lazo abierto

Con estos valores se graficó la curva estática de la planta, la cual se muestra en la Figura 3.12, 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, una vez excedido este valor la planta entra a su región 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.

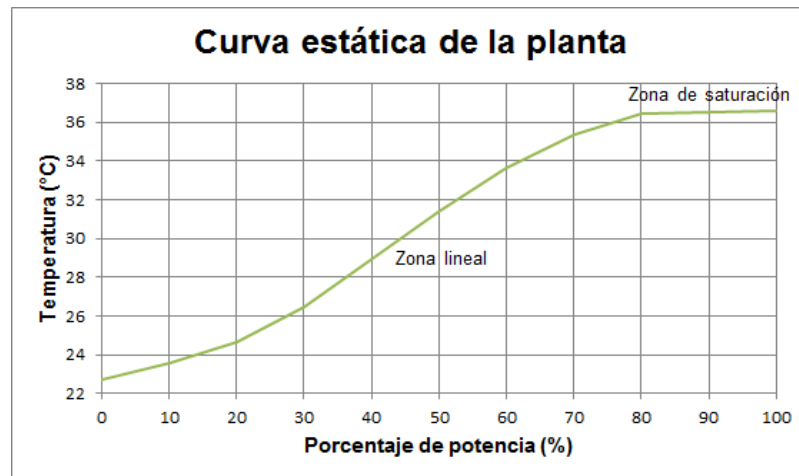


Figura 3.12. Curva estática de la planta

3.5.2. Obtención del modelo mediante la respuesta al escalón

Para obtener el modelo matemático del sistema se realizaron pruebas basadas en la curva de respuesta [16]. Estas pruebas se desarrollaron en lazo abierto según el diagrama mostrado en la Figura 3.11, 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 de la resistencia calefactora.

Se desarrolló un programa utilizando el software LabVIEW para visualizar la variable de temperatura (punto 2) luego de producido un cambio en la potencia disipada por la resistencia. Ver anexo 1. Este cambio representa en el sistema como una señal de tipo escalón (punto 1). A continuación se presentan en las Figuras 3.12, 3.13 y 3.14 las curvas de respuesta de la temperatura para diferentes cambios en el porcentaje de potencia:

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

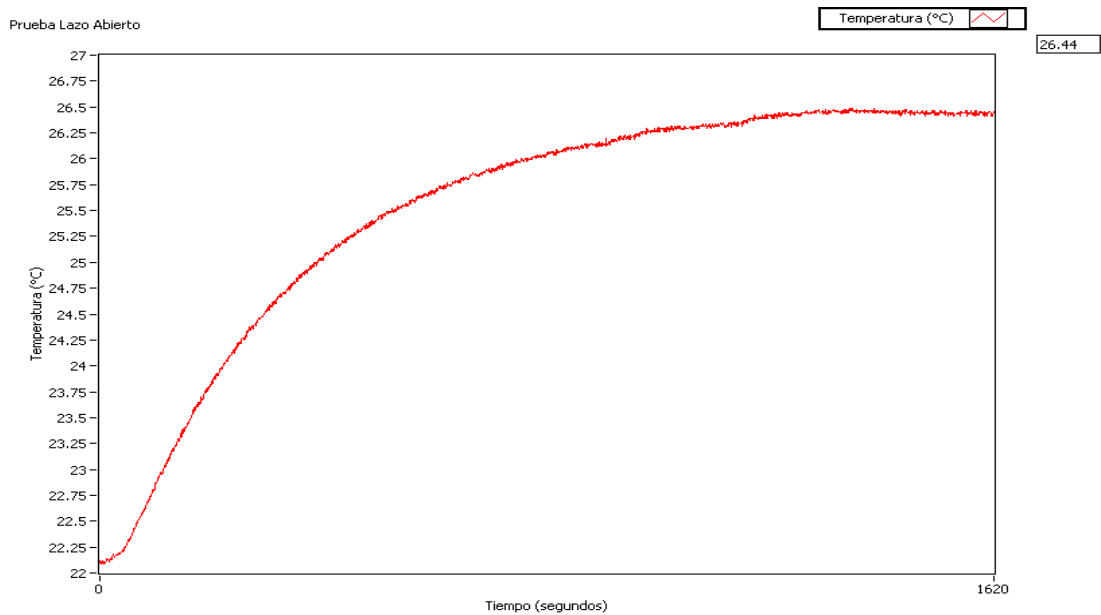


Figura 3.13. Respuesta a un cambio en la entrada de 0 a 30% de potencia

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

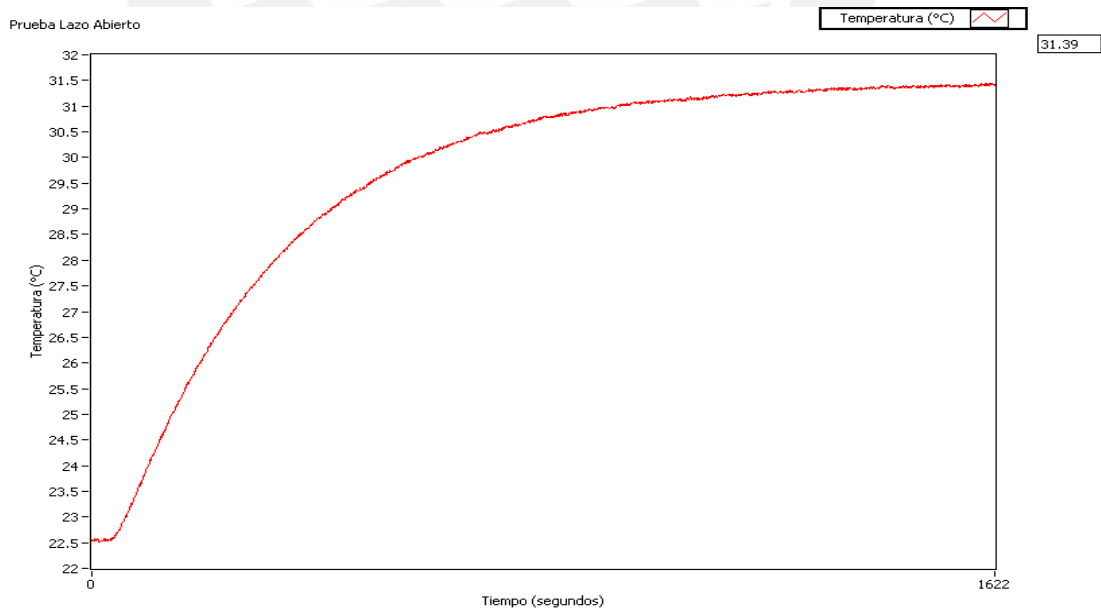


Figura 3.14. Respuesta a un cambio en la entrada de 0% a 50% de potencia

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

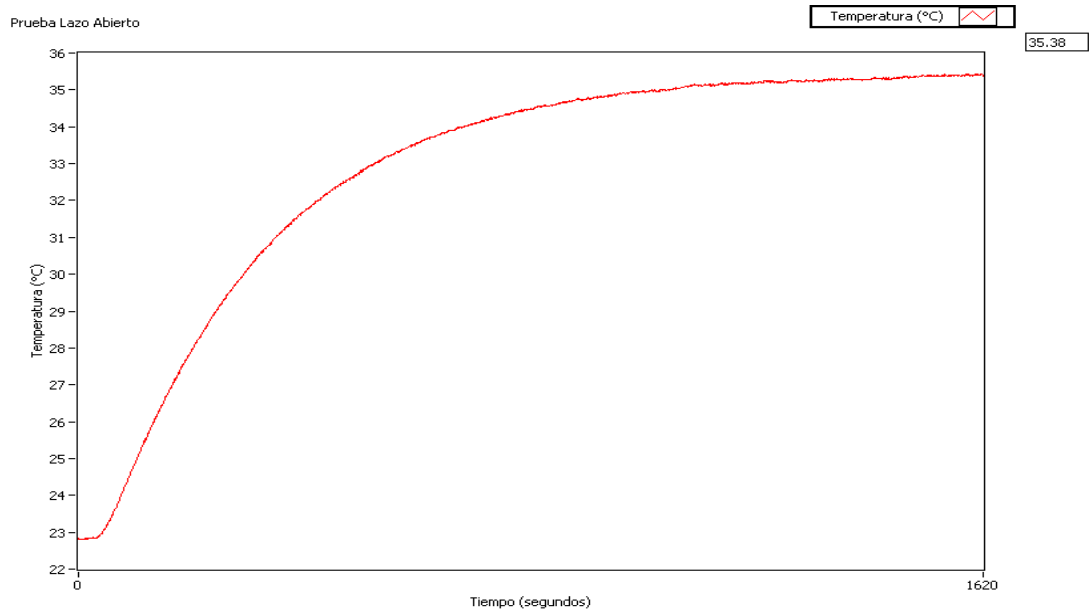


Figura 3.15. Respuesta a un cambio en la entrada de 0% a 70% de potencia

Una vez obtenidas estas curvas de respuesta se puede identificar que el proceso se comporta como uno de primer orden con retardo puro. Por lo tanto, su función de transferencia se puede aproximar utilizando las fórmulas que se muestran en la Figura 3.16.

Proceso de Primer Orden con Retardo Puro :

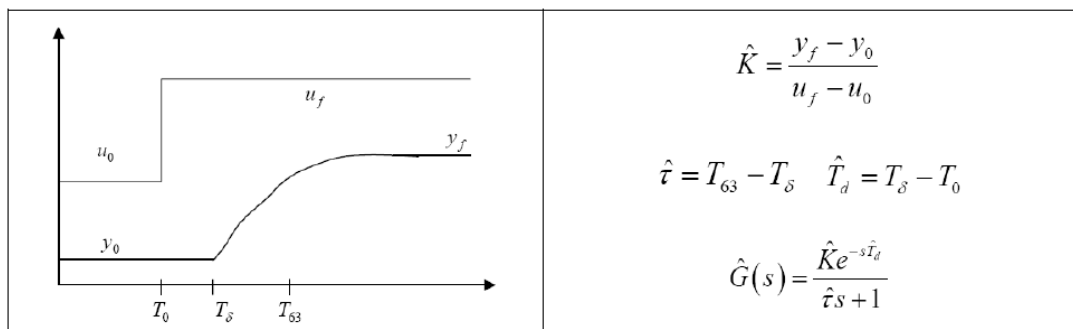


Figura 3.16. Proceso de primer orden con retardo puro

Para una lectura más precisa del comportamiento de la variable de temperatura en el tiempo, se implementó en LabVIEW un programa que almacene el valor de esta variable cada segundo. Ver anexo 1. Este tiempo fue determinado más adelante en el punto 3.8. En base a esto, se identificaron los parámetros para la curva de la Figura 3.13 utilizando las siguientes ecuaciones:

$$V_{entrada} (VDC) = \frac{5}{100} * P(\%) \quad (6)$$

$$V_{salida} (VDC) = \frac{324}{950} * (T (^{\circ}C) - 20.09) \quad (7)$$

$$u_0 = 0 \quad u_f = 1.5 \quad y_0 = 0.69575 \quad y_f = 2.16568 \quad T_0 = 20 \quad T_{\delta} = 38 \quad T_{63} = 355$$

Aplicando las fórmulas se obtienen:

$$K = \frac{2.16568 - 0.69575}{1.5} = 0.97995$$

$$\hat{t} = 355 - 38 = 317 \text{ segundos}$$

$$\hat{T}_d = 38 - 20 = 18 \text{ segundos}$$

Reemplazando estos parámetros para el cálculo de la función de transferencia se obtiene:

$$G(s) = \frac{0.97995 e^{-s18}}{317s + 1}$$

Siguiendo el mismo procedimiento del caso anterior, se obtienen los parámetros para la curva de la Figura 3.14 que son:

$$u_0 = 0 \quad u_f = 2.5 \quad y_0 = 0.83558 \quad y_f = 3.85389 \quad T_0 = 20 \quad T_{\delta} = 40 \quad T_{63} = 337$$

La función de transferencia calculada sería:

$$G(s) = \frac{1.20732 e^{-s20}}{297s + 1}$$

Para el caso de la curva de la Figura 3.15 se identifican los siguientes parámetros:

$$u_0 = 0 \quad u_f = 3.5 \quad y_0 = 0.92766 \quad y_f = 5.21469 \quad T_0 = 20 \quad T_{\delta} = 37 \quad T_{63} = 336$$

De manera similar se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{1.22487 e^{-s17}}{299s + 1}$$

Se puede observar que las funciones de transferencia halladas para las 3 curvas de respuesta son muy similares, por lo tanto, cualquiera de ellas modela adecuadamente el sistema. Para este caso, se trabajó con el modelo hallado en base a la curva de respuesta producida por un cambio en la potencia de 0 a 50%.

3.6. Validación del modelo matemático

Para validar el modelo calculado se realizó una simulación empleando el software Simulink. Para ello se desarrolló el diagrama de bloques de la Figura 3.17.

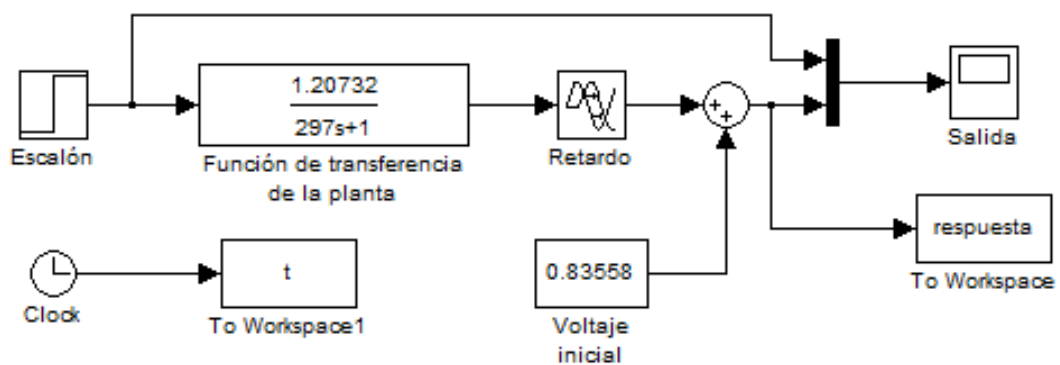


Figura 3.17. Simulación del sistema en lazo abierto

Se colocan los bloques de retardo y de voltaje inicial para simbolizar el tiempo muerto y las condiciones iniciales del sistema respectivamente. La entrada escalón representa el cambio en el porcentaje de potencia eléctrica de la resistencia calefactora.

La respuesta obtenida debido a un cambio de 0 a 50% de potencia se puede observar en la Figura 3.18. El sistema se estabilizó en aproximadamente 1600 segundos en un valor de 3.837 VDC (31.34 °C), siendo su comportamiento similar al sistema al obtenido experimentalmente en la Figura 3.14. Con esto queda demostrado que el modelo matemático hallado anteriormente es válido para este sistema.

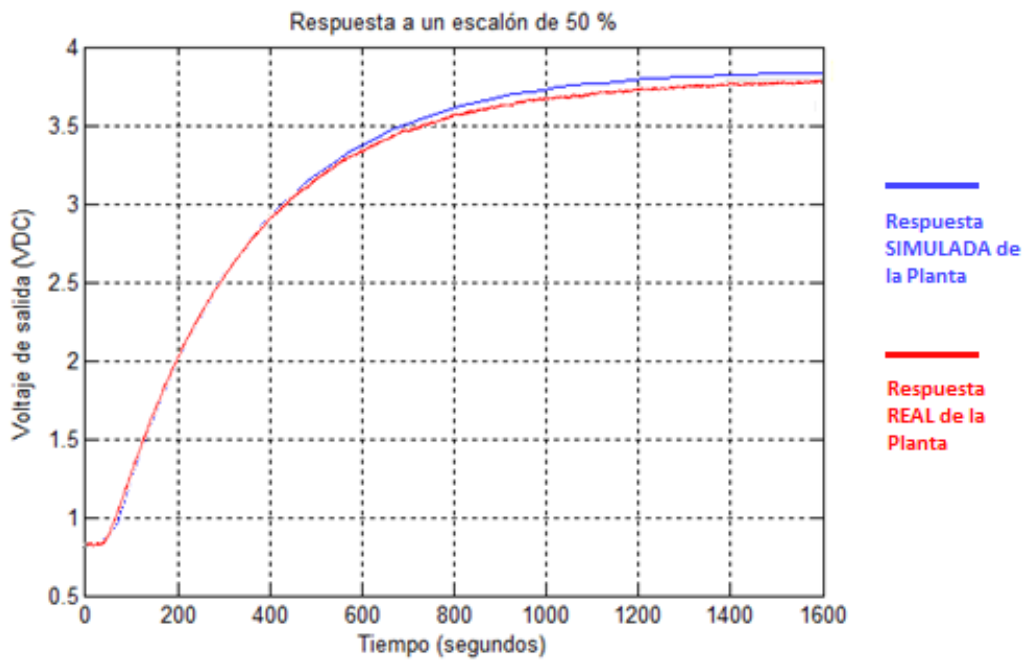


Figura 3.18. Respuesta obtenida por simulación ante un cambio de potencia de 0 a 50%

3.7. Diseño del algoritmo de control PID

Una vez obtenido el modelo matemático de la planta se procedió a diseñar el controlador del sistema, para lo cual se analizaron los requerimientos de diseño y los algoritmos de control que se emplean con mayor frecuencia en el control de procesos: Control On – Off y Control PID.

De acuerdo a la naturaleza del comportamiento de la variable de temperatura, se establecieron los siguientes requerimientos en la respuesta del sistema:

- Tiempo de establecimiento: ≤ 300 segundos
- % Máximo de sobreimpulso: 5%
- Error en estado estable: $< 0.5^{\circ}\text{C}$
- Tiempo de subida: < 100 segundos

El control On - Off es un algoritmo simple en el cual se envía la señal de activación al actuador (señal de control) cuando la variable de proceso es menor a la referencia y se desactiva cuando es mayor a la referencia. Como consecuencia se obtiene una oscilación controlada en la variable de proceso respecto a la referencia. Por otro parte, el control PID determina el error entre la variable de proceso y la

referencia; y en base a ello calcula una señal de control proporcional que permite tener una variable de proceso sin oscilación y que es capaz de responder a perturbaciones debido a la realimentación.

En base a esto, se determina que el algoritmo de control más adecuado para cumplir con los requerimientos del sistema es el control PID, ya que a diferencia del control On – Off permite tener valores muy bajos de error en estado estable y % máximo de sobreimpulso.

El controlador PID base que se utilizó se muestra en la siguiente ecuación [17]:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (8)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (9)$$

Sin embargo para evitar que se aplique la derivación a medidas de ruido de alta frecuencia y para impedir que cambios en el valor de la referencia produzcan cambios bruscos en la señal de control se emplea la siguiente modificación [18]:

$$U(s) = K_p \left(bY_{sp}(s) - Y(s) + \frac{E(s)}{T_i s} - \frac{sT_d}{1+s\frac{T_d}{N}} Y(s) \right) \quad (10)$$

En ella se adicionan los parámetros b y N . El primero sirve para que la acción proporcional solo actué sobre una parte de la referencia, lo cual mejora la respuesta al disminuir el sobreimpulso. Su valor se encuentra dentro del rango de 0 a 1. El segundo se conoce como máxima ganancia derivativa y sirve para limitar la ganancia de la acción derivativa en alta frecuencia. Su valor se encuentra frecuentemente en el rango de 3 a 20 [18].

Dado que el controlador es implementado en la computadora mediante el uso del software LabVIEW, es necesario discretizar la señal de control de la ecuación 6. Los métodos de discretización utilizados para la acción integral y la acción derivativa fueron el método trapezoidal y de diferencia hacia atrás (backward difference) respectivamente. Ver anexo 2. A continuación se muestra la señal de control discretizada para cada tipo de acción [17]:

$$\text{Proporcional:} \quad P(t_k) = K_p \left(by_{sp}(t_k) - y(t_k) \right) \quad (11)$$

$$\text{Integral: } I(t_k) = \frac{K_p}{T_i} T \sum_{k=0}^n \left(\frac{e(t_k) + e(t_{k+1})}{2} \right) \quad (12)$$

$$\text{Derivativa: } D(t_k) = \frac{T_d}{T_d + NT} D(t_{k-1}) - \frac{K_p T_d N}{T_d + NT} (y(t_k) - y(t_{k-1})) \quad (13)$$

Estas ecuaciones son finalmente desarrolladas e implementadas en LabVIEW con la finalidad de obtener el controlador del sistema. Ver anexo 3.

3.8. Sintonización del controlador PID

Para hallar los valores referenciales de los parámetros del controlador PID se utilizó el método de sintonización de Ziegler y Nichols para controladores que son representados por la ecuación 5. Este método relaciona el valor de los parámetros con el retraso del sistema L y su razón de reacción R como se muestra a continuación [19]:

$$K_p = \frac{2}{R * L} a \frac{3.33}{R * L} \quad (14)$$

$$T_i = 2.5 * L \quad (15)$$

$$T_d = 0.4 * L \quad (16)$$

Los valores de R y L se determinan a partir de la curva de reacción mostrada en la siguiente gráfica:

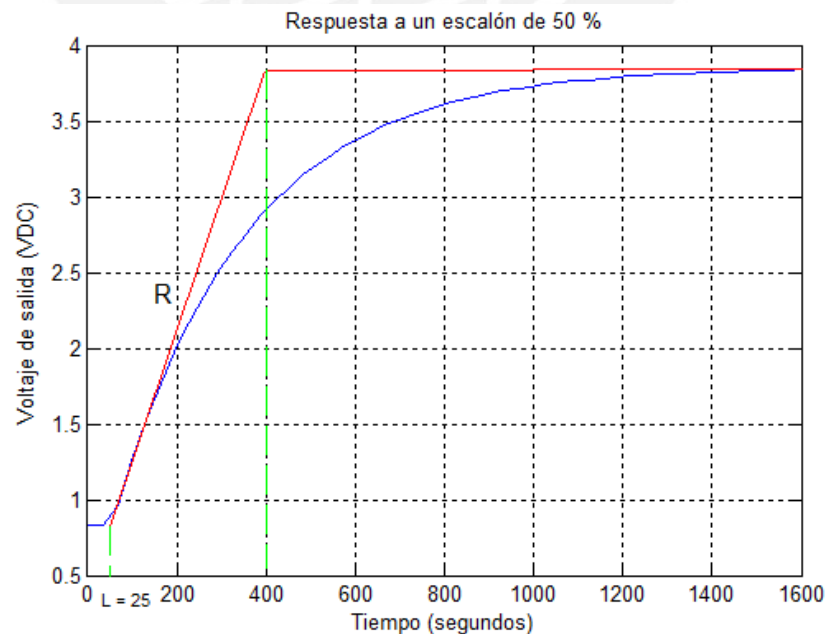


Figura 3.19. Curva de reacción

Para una adecuada selección del tiempo de muestreo en controladores PID se debe considerar que el adelanto de fase no sea afectado, para lo cual se utiliza la siguiente regla [16]:

$$\frac{T}{L} = 0.01 \text{ a } 0.06 \quad (17)$$

En base a esta regla, un valor adecuado de tiempo de muestreo (T) debe estar comprendido entre 0.25 y 1.5 segundos. Finalmente, luego de realizar unas pruebas con valores dentro del rango, se selecciona como tiempo de muestreo 1 segundo.

A fin de poder obtener una simulación más aproximada de la respuesta al controlador PID discreto seleccionado, se implementó el diagrama de bloques de la Figura 3.20 en Simulink. Para ello se convirtieron las funciones de transferencia de las acciones integral y derivativa de sistemas continuos a funciones de transferencia en Z para sistemas discretos utilizando el método de discretización por aproximación de Tustin representado por la siguiente ecuación [22]:

$$s = \frac{2z-1}{Tz+1} \quad (18)$$

Reemplazando el valor del tiempo de muestreo a 1 segundo según lo calculado anteriormente:

$$s = 2 \frac{z-1}{z+1}$$

Reemplazando en la función de transferencia de la acción integral:

$$I(s) = \frac{1}{T_i s}$$

$$I(z) = \frac{1}{2T_i \frac{z-1}{z+1}}$$

$$I(z) = \frac{z+1}{2T_i z - 2T_i}$$

Reemplazando en la función de transferencia de la acción derivativa:

$$D(s) = \frac{T_d s}{N s + 1}$$

$$D(z) = \frac{2T_d \frac{z-1}{z+1}}{2 \frac{T_d}{N} \frac{z-1}{z+1} + 1}$$

$$D(z) = \frac{2T_d N z - 2T_d N}{(2T_d + N)z + (N - 2T_d)}$$

Los valores de b y N se encuentran dentro de los rangos de 0 a 1 y 3 a 20 respectivamente de acuerdo a lo indicado en la sección 3.7 [18]. El valor de b se determinó en 0.8 para las pruebas mostradas en adelante ya que no es necesaria una mayor limitación de la referencia en el cálculo del error. De manera similar, el valor de N se determinó en 10 para las posteriores pruebas debido a que el proceso de temperatura es lento y con poca existencia de perturbaciones de alta frecuencia por lo que no se requiere una mayor limitación.

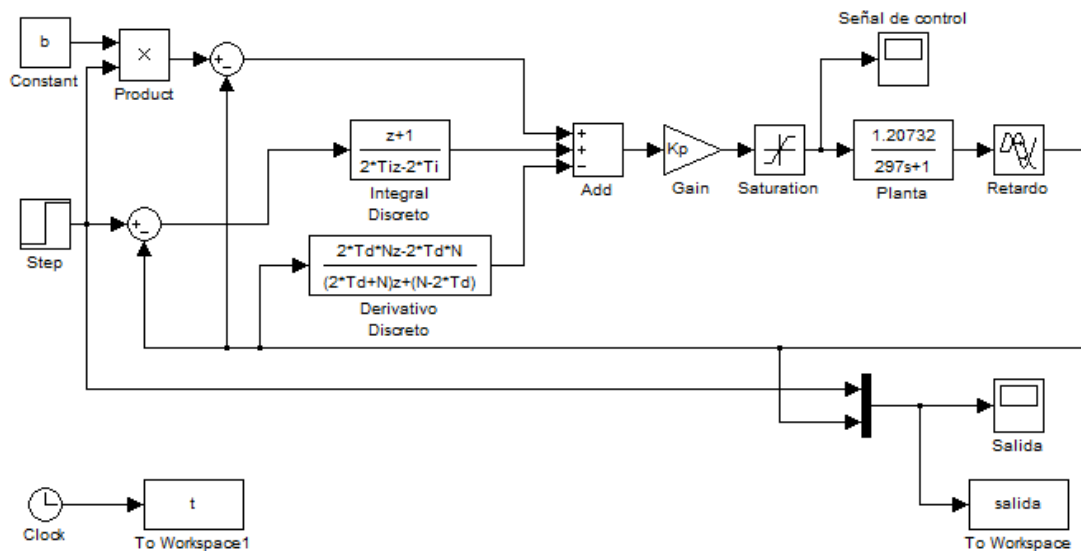


Figura 3.20. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado con PID discreto

En base a la Figura 3.19 se obtienen los valores $R = 0.0088277$ y $L = 25$. A partir de los cuales se calculó los parámetros del controlador y se realizó la simulación mostrada en la Figura 3.21.

$$K_p = 9.062 \text{ a } 15.089$$

$$T_i = 62.5$$

$$T_d = 10$$

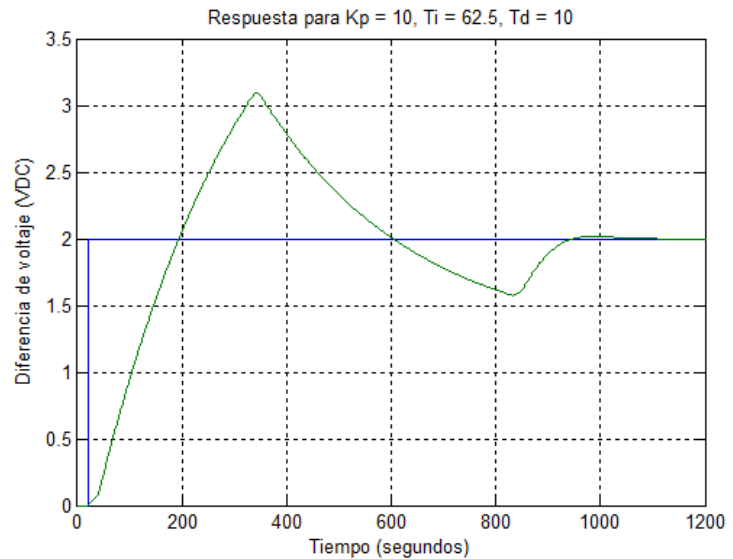


Figura 3.21. Respuesta obtenida de la sintonización

Se obtuvo una respuesta con un sobreimpulso mayor a 1 VDC y con un tiempo de establecimiento de aproximadamente 1000 segundos. Con la finalidad de disminuir este sobreimpulso y el tiempo de establecimiento, se aumentó el tiempo integral (T_i) a un valor de 292. Luego de realizar las pruebas la respuesta aun presentaba sobreimpulso, por lo que se disminuyó la constante proporcional (K_p) a un valor de 8 y se consiguió la siguiente respuesta:

$$K_p = 8$$

$$T_i = 292$$

$$T_d = 8$$

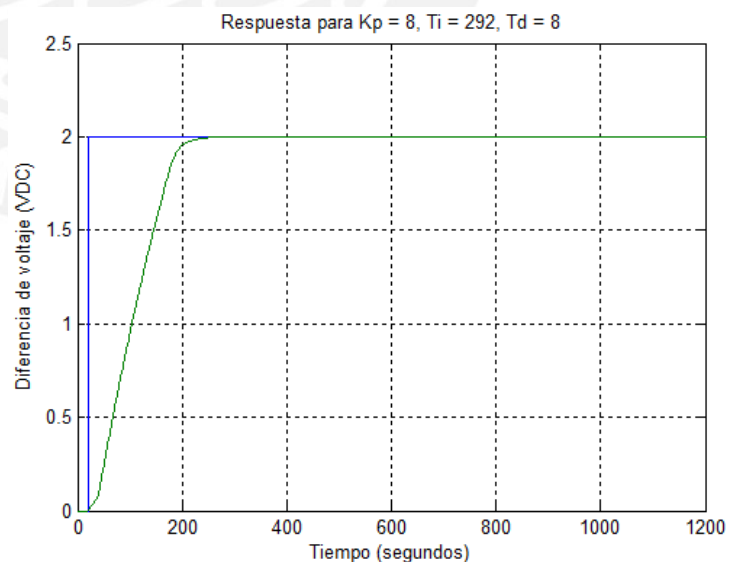


Figura 3.22. Respuesta obtenida de la sintonización modificada

Con estos parámetros se obtiene una mejor respuesta al disminuir notablemente el sobreimpulso y el tiempo de establecimiento a aproximadamente 300 segundos.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO-ELÉCTRICO

En este capítulo se describe la implementación de los circuitos de acondicionamiento para que los sensores y actuadores presentes en el sistema de control de temperatura operen adecuadamente. Asimismo, se presenta la implementación de los componentes mecánicos del módulo educativo.

4.1. Implementación del sistema eléctrico

4.1.1. Acondicionamiento para el sensor de temperatura

Para la lectura de la variable de temperatura se utilizó el sensor LM35, el cual tiene la propiedad de ser lineal con una relación de salida de 10 mV/°C. Por lo tanto, no fue necesario el diseño de un circuito de acondicionamiento para conseguir la linealidad de la señal. Sin embargo, dado que la señal eléctrica que genera el sensor se encuentra en el rango de los milivoltios, es necesario amplificarla hasta abarcar todo el rango de entrada analógica del DAQ (0 a 10 VDC) y de esta forma obtener una mayor resolución en la lectura.

Con esta finalidad se adquirió el amplificador de instrumentación INA121 que tiene entre sus características principales un bajo consumo de energía, una baja variación del offset con la temperatura ($TCV_{OS} \approx 2 \mu V/^{\circ}C$) y una alta relación de rechazo en modo común ($CMRR \approx 100 \text{ dB}$). Esto lo hace apropiado para amplificar la señal del sensor reduciendo la amplificación de ruido y el error debido a la variación de temperatura. El circuito de la Figura 4.1 muestra las conexiones básicas para el funcionamiento del INA121 que se recomienda en su hoja de datos.

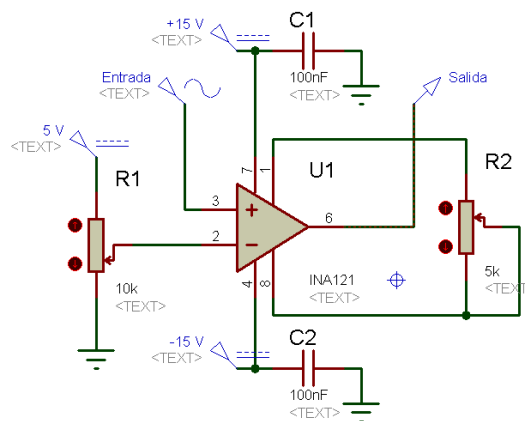


Figura 4.1. Circuito para el INA121

La temperatura inicial del agua en el tanque es de alrededor de 21 °C por lo que a la salida del sensor existe un voltaje aproximado de 210 mV. Para reducir este voltaje de offset se agregó un voltaje de 200 mV en la entrada negativa por medio del potenciómetro R1. A continuación se muestra la ecuación de salida del circuito:

$$V_{sal} = G * (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) \quad (19)$$

$$G = 1 + \frac{50 K\Omega}{R2} \quad (20)$$

Dado que la máxima temperatura de trabajo en el módulo educativo es de 50 °C, el voltaje máximo a la salida del sensor es de 500 mV. Además, conociendo que el voltaje máximo a la entrada del DAQ es de 10 VDC, se calculó la ganancia G y el valor de R2 empleando la ecuación 19 y 20 respectivamente. Puesto que el valor de R2 hallado no es comercial, se utilizó un potenciómetro de precisión de 5 KΩ.

$$G = \frac{10}{0.5 - 0.2} = 33.3$$

$$R2 = \frac{50}{33.3 - 1} = 1.55 K\Omega$$

Con el fin de reducir el ruido proveniente del sensor se implementó un filtro activo a la salida del circuito. La señal que se desea filtrar es en esencia un voltaje DC (frecuencia = 0 Hz). Por ello se establecieron los siguientes requerimientos para el diseño filtro:

- Nivel de ruido a atenuar: 17 dB @ 1.75 KHz
- Tipo de filtro: Butterworth pasabajos
- Topología: Sallen-Key
- Ganancia: 1
- Frecuencia de corte: 1 Hz
- Frecuencia de rechazo: 5 Hz
- Atenuación en la banda de paso: 3 dB
- Atenuación en la banda de rechazo: 50 dB

En base a estos se implementó el filtro que se observa en la Figura 4.2 [20]. Los cálculos de los valores de resistencias y condensadores se muestran en el anexo 4.

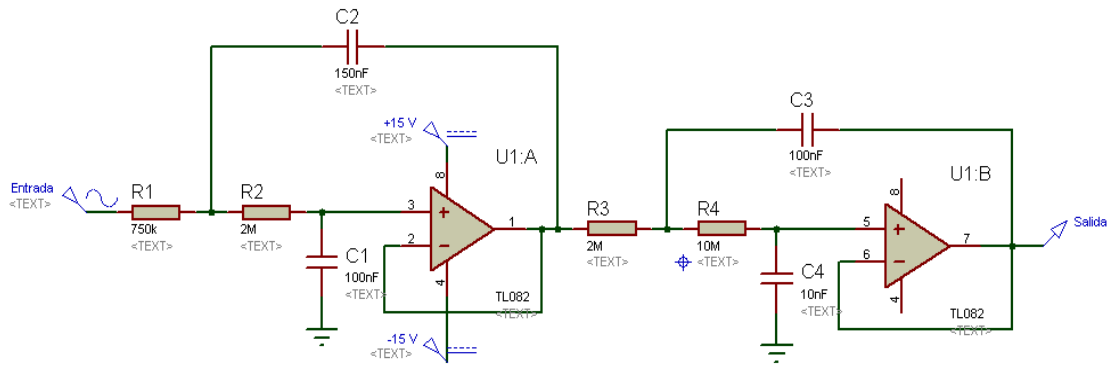


Figura 4.2. Filtro para el sensor de temperatura

El funcionamiento del filtro se puede apreciar en la simulación de la Figura 4.3 obtenida del software Proteus de Labcenter Electronics.

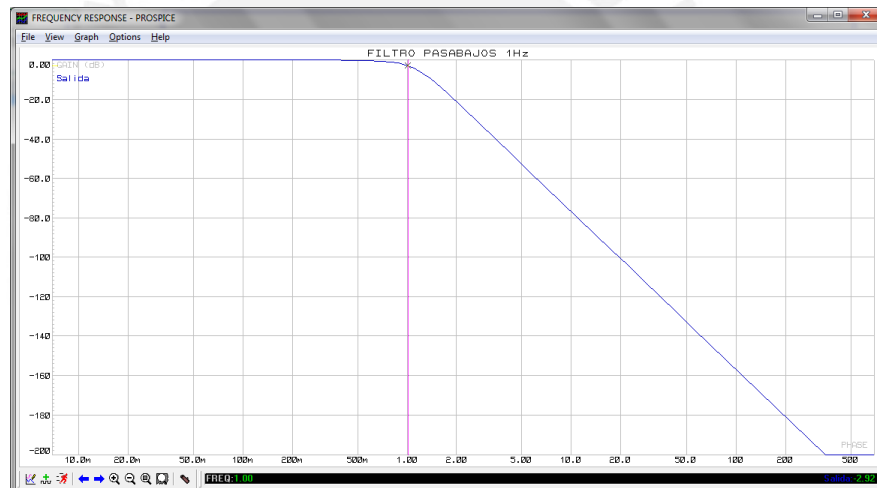


Figura 4.3. Simulación del funcionamiento del filtro

Los filtros pasabajos introducen una fase negativa al sistema por lo que al implementar este circuito se reducirá el margen de fase. Esta reducción puede ocasionar que el sistema en lazo cerrado se vuelva inestable [24]. La figura 4.4 muestra el diagrama de bode del sistema una vez implementado el filtro. En esta gráfica se puede observar que el margen de fase (P_m) es positivo (146°) y por tanto el sistema es estable.

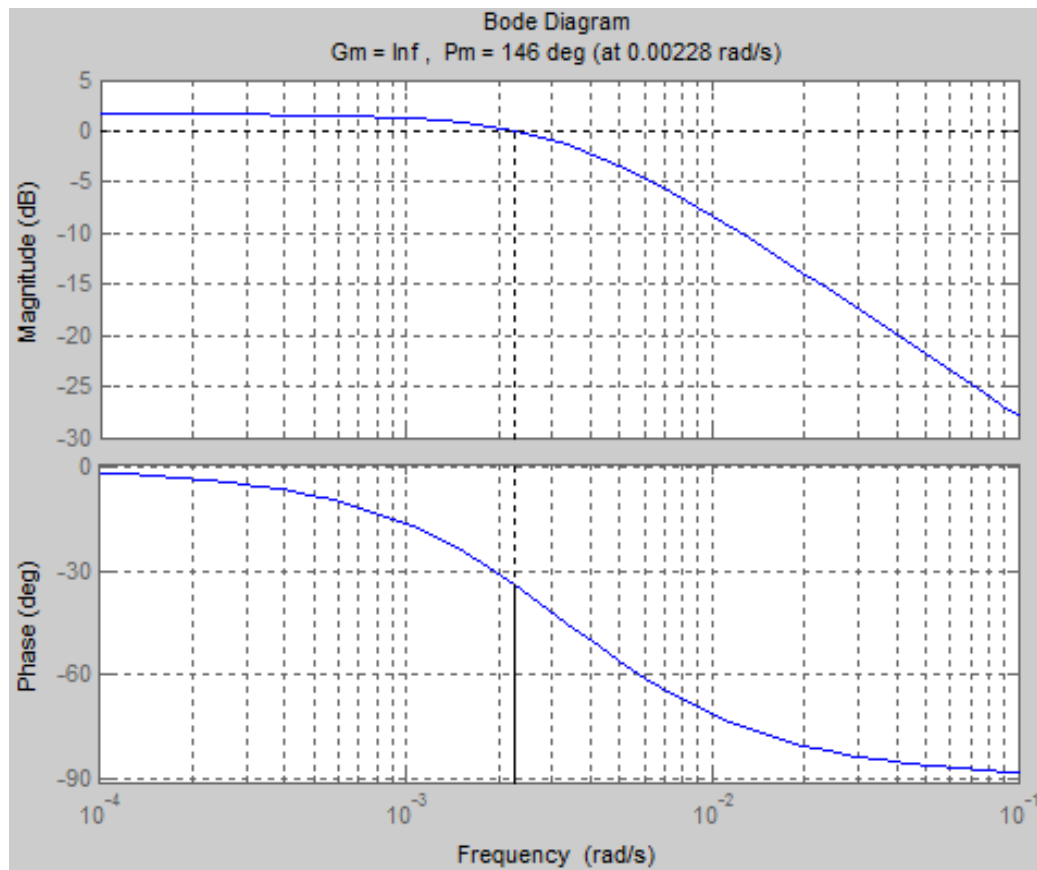


Figura 4.4. Diagrama de bode del sistema en lazo cerrado

4.1.2. Acondicionamiento para el control de potencia de la resistencia calefactora

Un tema esencial en sistemas térmicos es tener un adecuado manejo sobre el elemento de potencia que genera el calor, en este caso de la resistencia calefactora. Debido a que esta resistencia utiliza voltaje alterno para producir calor, se requiere diseñar circuitos de acondicionamiento que permitan controlar la potencia que esta disipa utilizando el voltaje de salida de la tarjeta de adquisición de datos. Uno de los métodos más usados para conseguir este propósito es por medio del control del ángulo de disparo de un dispositivo de potencia como el TRIAC, el cual se activa luego de un tiempo programado a partir de la señal de sincronización que produce un detector de cruce por cero. En la Figura 4.5 se muestra el esquema de este método aplicado al módulo educativo.

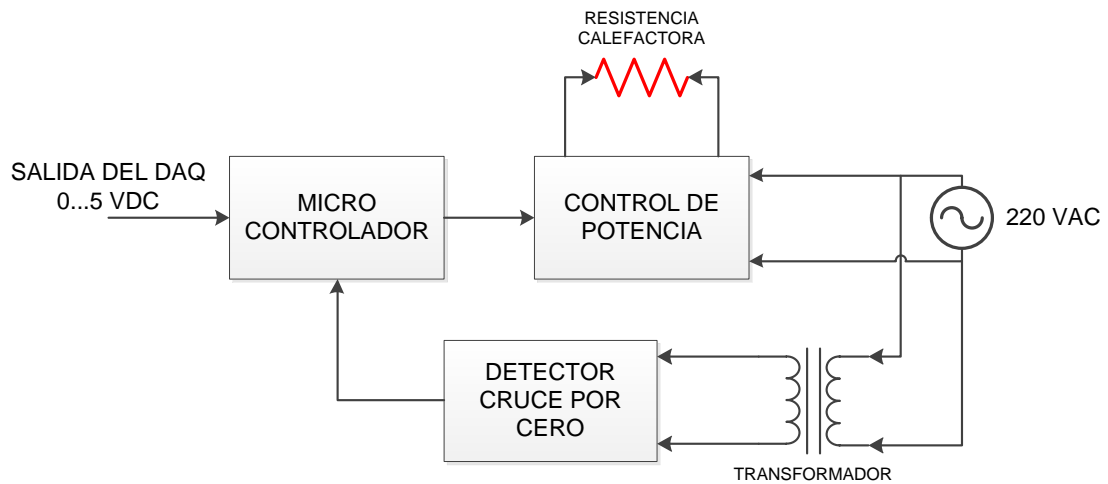


Figura 4.5. Esquema para control de potencia de la resistencia calefactora

Con la finalidad de evitar interferencias eléctricas entre los circuitos de control y de potencia se utilizó un transformador, el cual permite el aislamiento galvánico entre ambos circuitos [25].

4.1.2.1. Detector de cruce por cero

Como se requiere controlar la potencia que disipa la resistencia calefactora por medio de la variación del ángulo de disparo de un TRIAC, es necesario obtener una señal que permita sincronizar su activación con la red eléctrica de 220 VAC, la cual tiene una frecuencia de aproximadamente 60 Hz. Esta señal será entregada al microcontrolador, por eso lo más conveniente es que sea una onda cuadrada y pueda ser recibida como una entrada digital.

El circuito del detector de cruce por cero se muestra en la Figura 4.6. La entrada procede de un transformador que reduce la tensión de la red eléctrica a 15 VAC conservando su frecuencia de 60 Hz. Esta señal se atenúa a través de un divisor de tensión para que pueda ingresar a la entrada positiva del comparador LM311. Esta, a su vez, se compara con el voltaje en la entrada negativa que se encuentra conectada a GND. La salida colector se acopla a 5 VDC por medio de una resistencia de 20 K Ω (valor que sugiere el fabricante) para limitar la corriente que pasa por el transistor interno del comparador, mientras que la salida emisor se conecta a GND. De este modo, el circuito entrega 5 VDC cuando la forma de onda en la red eléctrica se encuentra en la comba positiva y 0 VDC cuando se encuentra en la comba negativa.

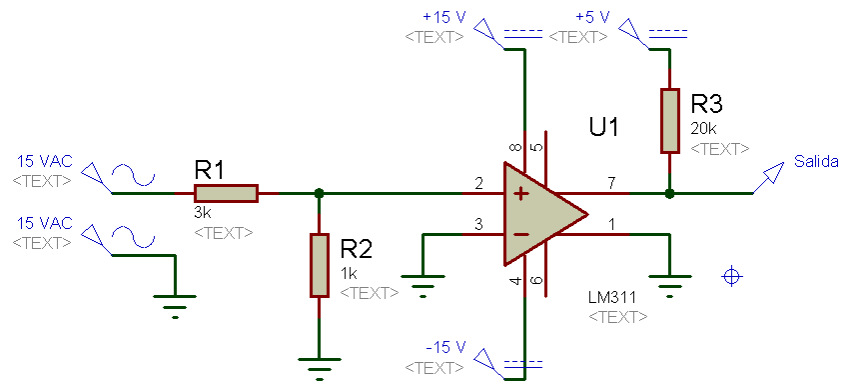


Figura 4.6. Circuito detector de cruce por cero

Como se puede apreciar en la simulación de la Figura 4.7 la señal de salida (color rojo) cambia de estado rápidamente cada vez que ocurre un cruce por cero en la señal de 15 VAC proveniente del transformador. Por lo tanto, este circuito permite obtener de una manera sencilla la señal de sincronización requerida para la activación del TRIAC.

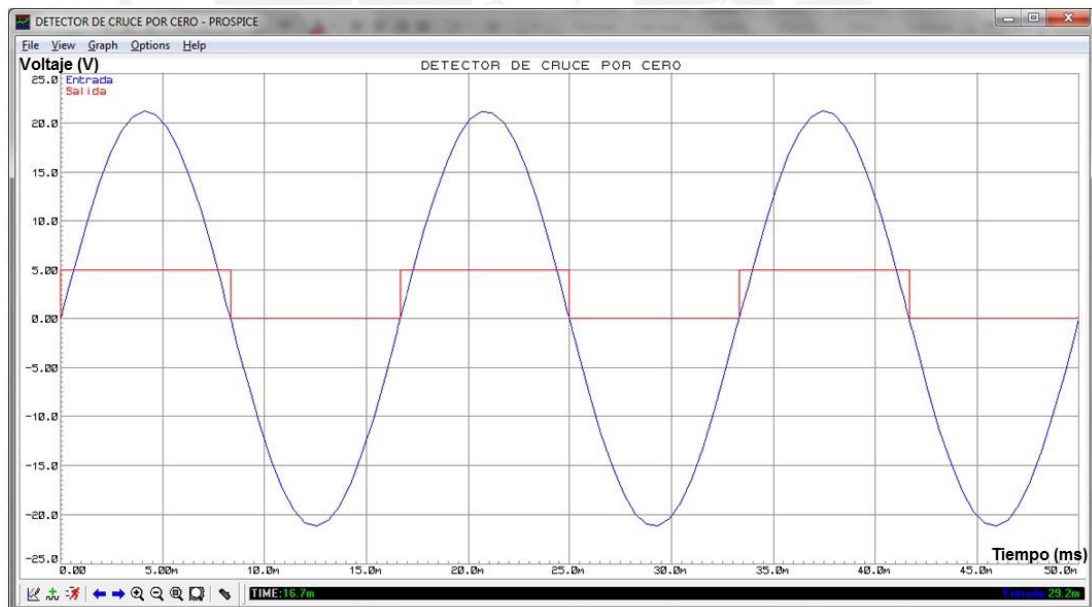


Figura 4.7. Simulación del detector de cruce por cero

4.1.2.2. Microcontrolador

Una vez obtenida la señal de sincronización de la red eléctrica es necesario activar el TRIAC variando su ángulo de disparo para controlar la potencia disipada en la resistencia calefactora. Para ello se utiliza un microcontrolador, el cual recibe como entrada la señal de sincronización y un voltaje variable de 0 a 5 VDC que sirve para modular la potencia disipada. Por lo tanto, el microcontrolador a escoger debe ser capaz de recibir una señal analógica con una óptima resolución y tener la característica de interrupción externa por cambio de estado que será activada por el circuito detector de cruce por cero.

Actualmente en el mercado nacional existe una gran variedad de microcontroladores, siendo los de mayor presencia los fabricados por las empresas Microchip y Atmel. Ambas empresas tienen dentro de su portafolio microcontroladores con características similares. Se adquirió el ATmega8 de Atmel debido a que, además de cumplir con los requerimientos planteados, tiene un menor costo y presenta una mayor cantidad de instrucciones, lo cual proporciona una mayor flexibilidad en la programación.

Las Figuras 4.7 y 4.8 muestran el diagrama de flujo del proceso principal y del proceso de generación de señal para la activación del TRIAC respectivamente. Se puede apreciar que la función del programa principal es convertir la señal de entrada analógica proveniente del DAQ a un código binario que luego se almacena en una variable. El proceso de generación de señal se realiza utilizando la interrupción por cambio de estado en una señal externa, la cual viene del detector de cruce por cero. Este proceso genera la activación de una señal con un retardo variable dependiente del código que se almacena en el programa principal.

La simulación del programa se desarrolla mediante el software VMLAB haciendo uso de la herramienta osciloscopio. En la Figura 4.10 se muestra cuando el voltaje de entrada variable, representado por el potenciómetro S1, es 0 VDC por lo cual la señal de salida (PBO) mantiene este mismo valor indicando que el TRIAC se mantiene desactivado en todo momento (ángulo de disparo de 180°). La Figura 4.11 muestra cuando el voltaje de entrada es 5 VDC, por ello la señal de salida también muestra este mismo valor manteniendo activado el TRIAC con un ángulo de disparo de 0° . Finalmente, la Figura 4.12 muestra cuando el voltaje de entrada es 1.66 VDC y por tanto el ángulo de disparo cambia a 110.16° . También se puede

observar la sincronización de la señal de salida del microcontrolador con la señal del detector de cruce por cero (PD2).

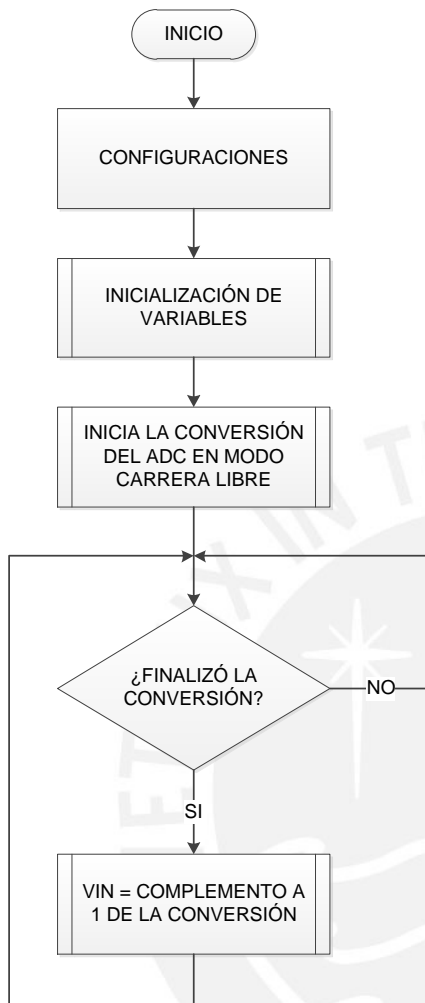


Figura 4.8. Diagrama de flujo principal

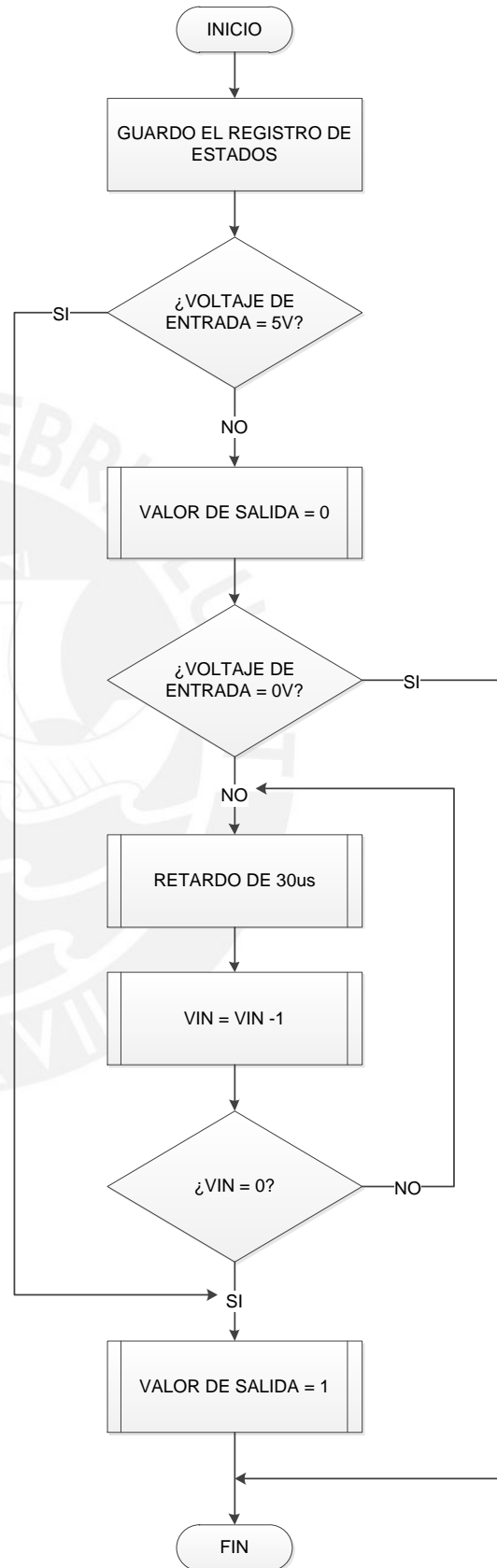


Figura 4.9. Diagrama de flujo de la generación de señal

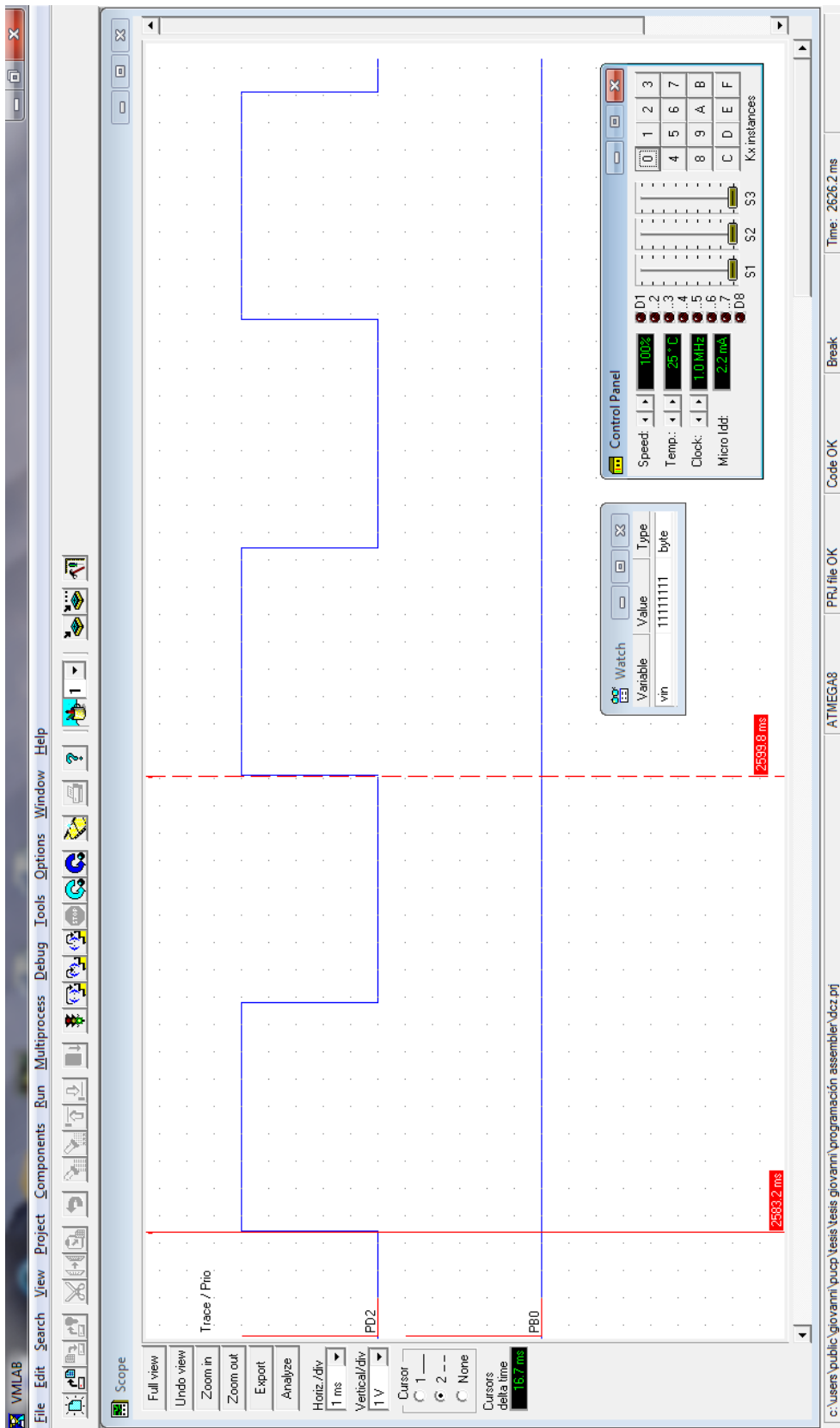


Figura 4.10. Señales del detector de cruce por cero y de salida cuando la entrada es 0 VDC

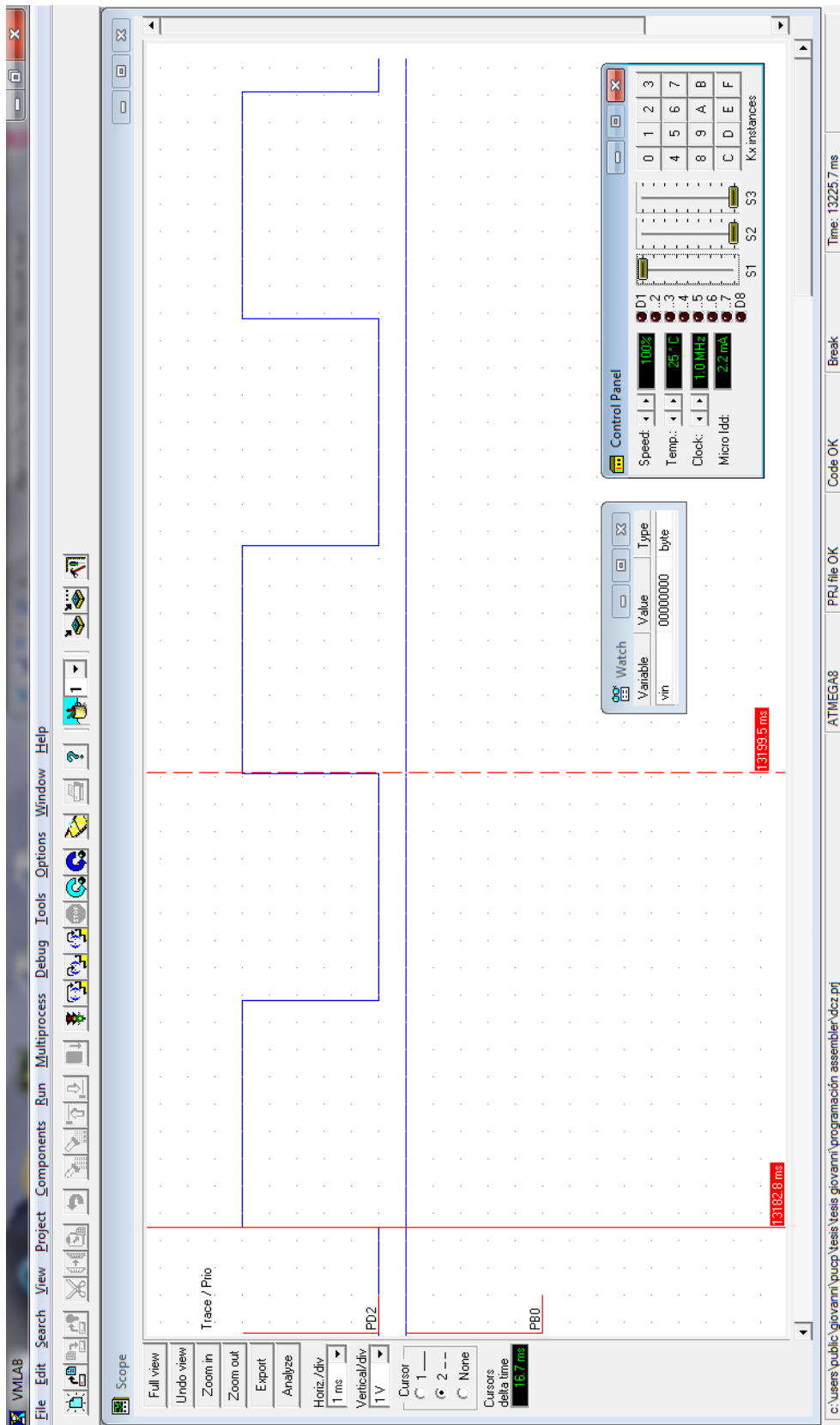


Figura 4.11. Señales del detector de cruce por cero y de salida cuando la entrada es 5 VDC

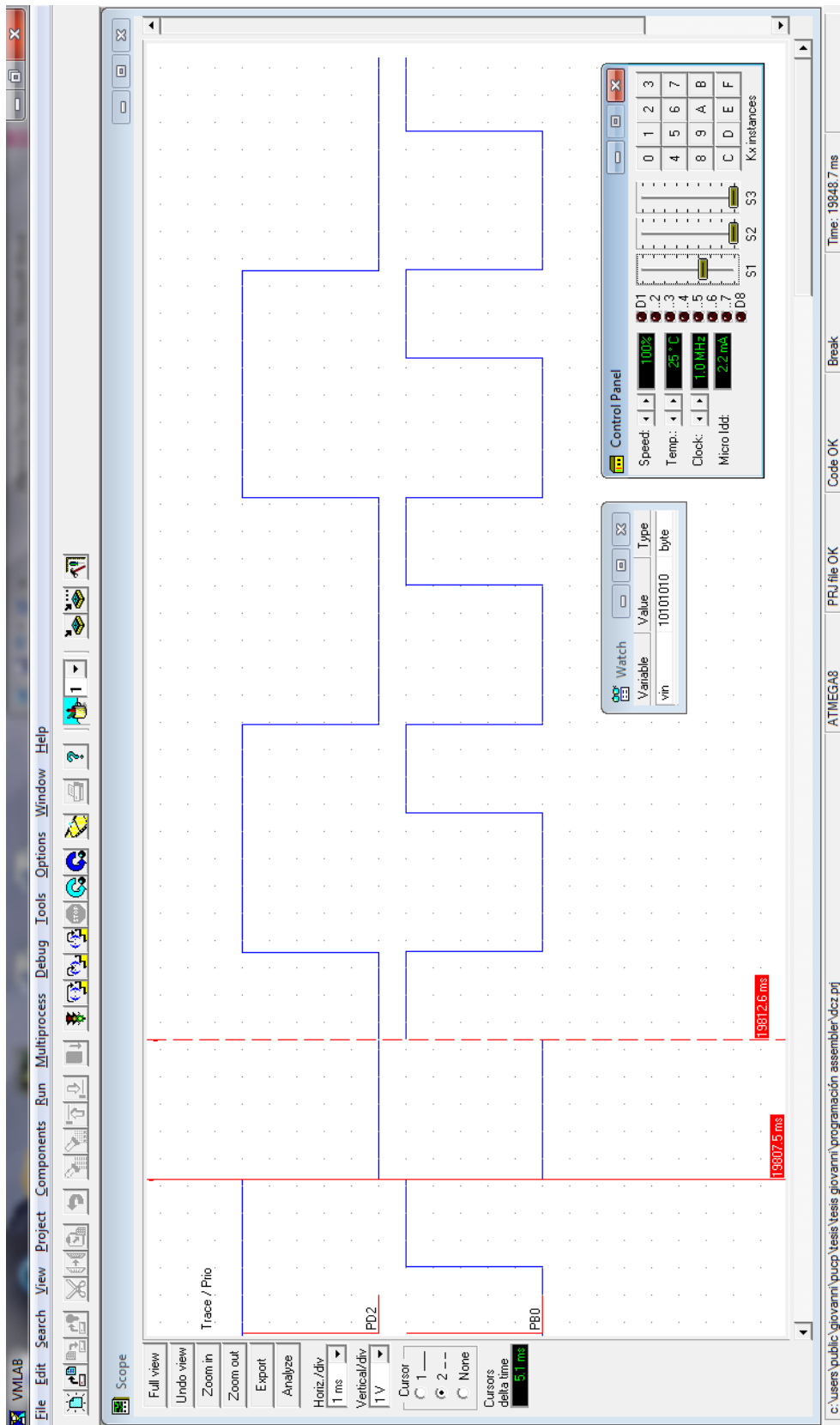


Figura 4.12. Señales del detector de cruce por cero y de salida cuando la entrada es 1.66 VDC

4.1.2.3. Control de potencia.

Una vez obtenida la señal de activación del TRIAC para controlar la potencia disipada por la resistencia, es necesario utilizar algún tipo de aislamiento entre el circuito de control y del de potencia. De esta manera aseguramos que una corriente alta en la etapa de potencia no dañe ningún equipo de la etapa de control. Uno de los procedimientos más utilizados para esta finalidad es el aislamiento óptico como se muestra en el circuito de la Figura 4.13, en donde se emplea un optotriac.

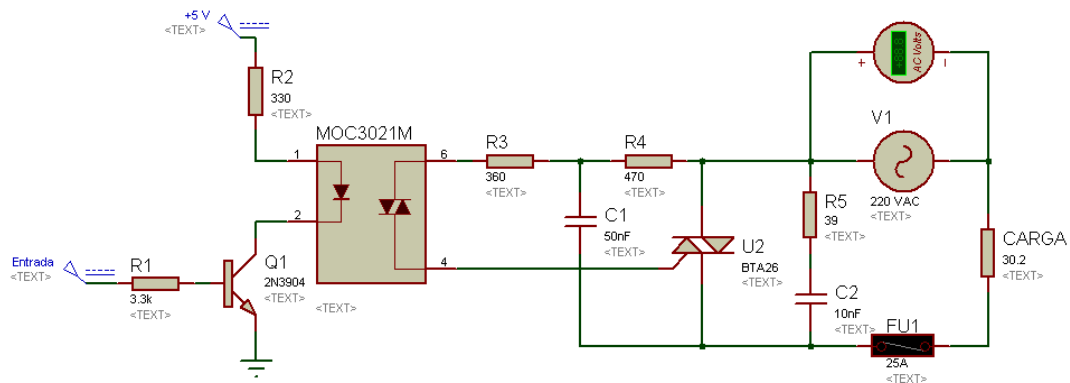


Figura 4.13. Circuito para la activación de la resistencia calefactora

El microcontrolador envía la señal de activación a la entrada del circuito pero dado que este no es capaz de entregar la suficiente corriente al LED del optotriac, se usa un transistor que opera en corte y saturación. Tomando como criterio de diseño que $I_{COLECTOR} = 10 * I_{BASE}$ y además sabiendo que el $V_{CE(SAT)} = 0.2$ VDC, que el $V_{BE(SAT)} = 0.7$ VDC, que la $I_{LED} = 10$ mA y que el $V_{LED} = 1.15$ VDC se calcula las resistencias R1 y R2 de la siguiente manera:

$$R1 = 10 * \frac{5 - 0.7}{0.01} = 4.3 \text{ K}\Omega$$

$$R2 = \frac{5 - 1.15 - 0.2}{0.01} = 365 \Omega$$

Por lo tanto, se escoge $R1 = 3.3 \text{ K}\Omega$ y $R2 = 330 \Omega$ por ser los valores comerciales más cercanos a los requeridos. Con la finalidad de limitar la corriente que pasa por el optotriac se coloca una resistencia de 360Ω , valor que se recomienda en su hoja de datos. También se colocan dos redes snubber conformadas por R4-C1 y R5-C2 para evitar que tanto el optotriac como el TRIAC de potencia se activen por $\frac{dV}{dt}$. Los valores de las resistencias y los condensadores son los que sugiere el fabricante.

El requerimiento más importante para seleccionar adecuadamente el TRIAC de potencia es que pueda tolerar la corriente que circula por la resistencia calefactora de 2 KW cuando esta disipa su máxima potencia. Para el cálculo de la corriente mencionada más un factor de diseño de 1.5 se emplea la siguiente ecuación:

$$I_{max} = \frac{2000}{220} = 9.09 A$$

$$I_{diseño} = 1.5 * 9.09 = 13.64 A$$

Por lo tanto, se adquiere el TRIAC BTA26 que soporta hasta 25 A y además se presenta en encapsulado TOP3 teniendo una mayor separación entre sus pines que los de encapsulado TO-220. Esto permite colocar un ancho de pista adecuado en la tarjeta para que pueda circular la corriente sin problemas.

En la Figura 4.14 se muestra las formas de onda de voltaje en la carga conectada al triac para ángulos de disparo de 30° y 120° [26]. Se observa que la potencia que disipará la resistencia calefactora disminuye a medida que aumenta el ángulo de disparo.

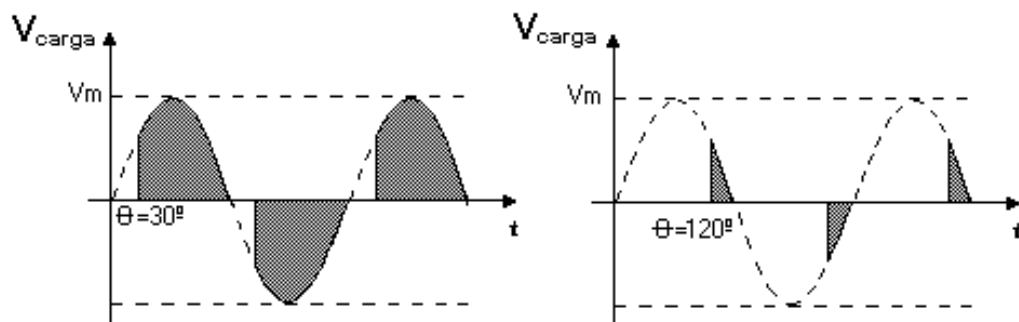


Figura 4.14. Voltaje en la resistencia calefactora según el ángulo de disparo.

4.1.3. Acondicionamiento para el agitador

Uno de los requisitos que se plantea para el funcionamiento del agitador es que su activación se pueda realizar mediante una salida digital del DAQ. Para ello, es necesario un circuito de acondicionamiento que permita aislar la etapa de potencia de la etapa de control y así evitar que el ruido eléctrico proveniente del motor afecte a esta última. Al igual que el caso anterior se emplea aislamiento óptico con la diferencia de que se utiliza un fototransistor como se muestra en la Figura 4.15.

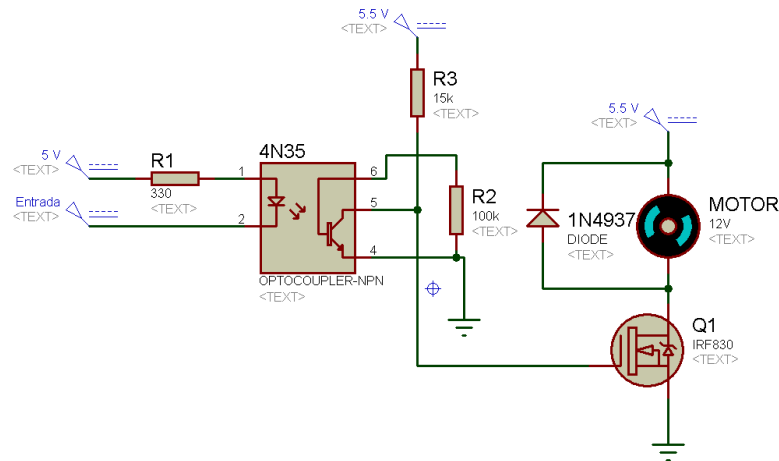


Figura 4.15 Circuito para activación del agitador

Según especificaciones técnicas del fabricante el $V_{LED} = 1.18 \text{ VDC}$ y $I_{LED} = 10 \text{ mA}$ por lo que se calcula la resistencia R1 de la siguiente manera:

$$R1 = \frac{5 - 1.18}{0.01} = 382 \Omega$$

Entonces se escoge $R1 = 330 \Omega$ por ser el valor comercial más cercano al requerido. La resistencia R2 se añade para mejorar el tiempo de respuesta del optoacoplador.

Puesto que el fototransistor no es capaz de entregar la corriente necesaria para hacer funcionar el motor; se adquiere el MOSFET IRF830, por el cual pueden circular hasta 4.5 A y es adecuado para poner en marcha el motor que consume cerca de 400 mA. Finalmente, se coloca la resistencia R3 para limitar la corriente que ingresa por el GATE y el diodo de protección para descargar la corriente almacenada por el motor durante su funcionamiento.

4.2. Implementación del sistema mecánico

A continuación se presenta el diagrama esquemático con el ensamble total de los componentes mecánicos del sistema. Asimismo, se muestran algunas imágenes del sistema implementado. Es importante resaltar que el montaje de todos estos elementos fue supervisado y orientado por el técnico especialista del CETAM, Harol La Chira. La Figura 4.16 muestra el esquema de montaje de los elementos mecánicos en la estructura del sistema.

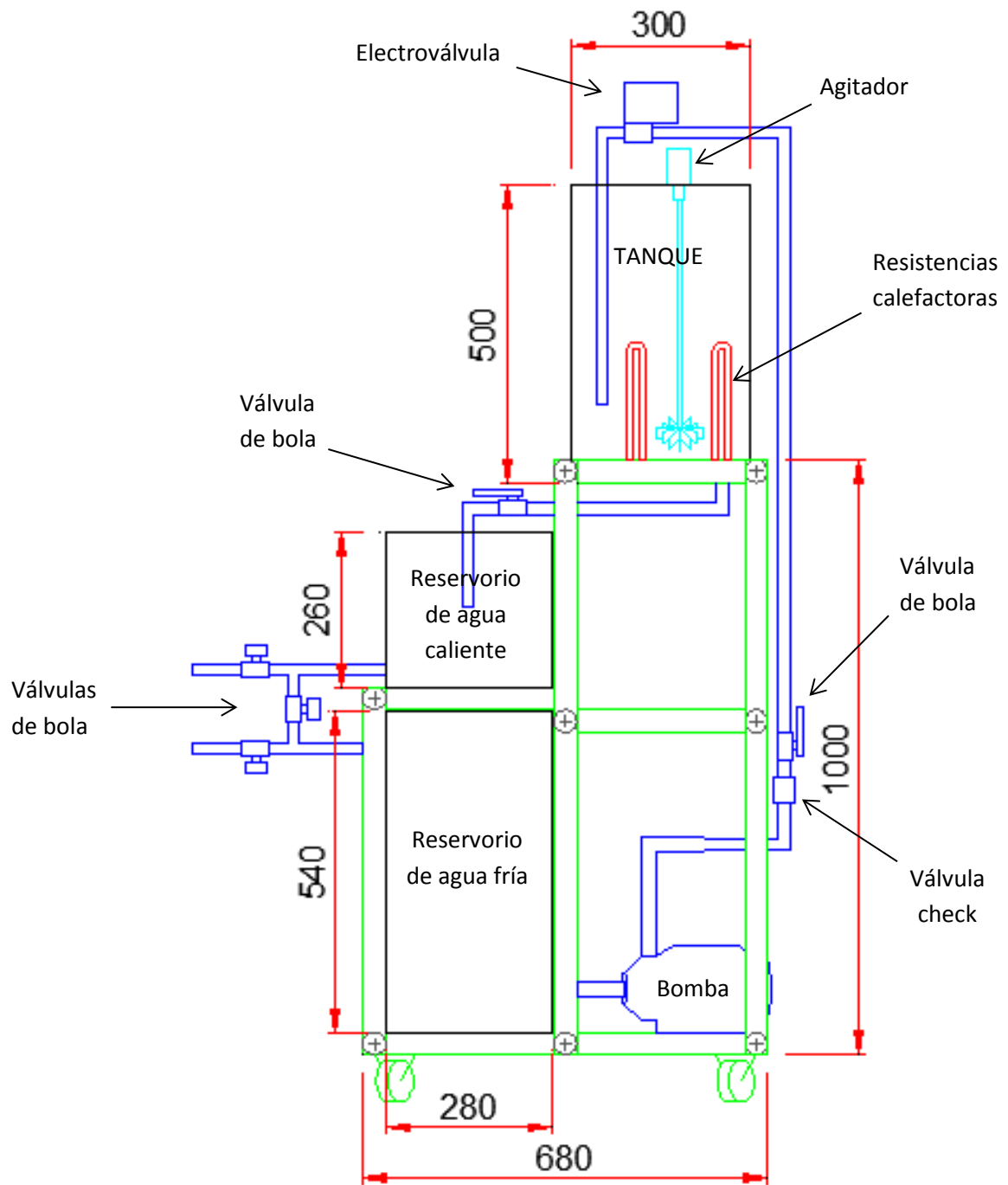


Figura 4.16. Plano general del módulo educativo

La Figura 4.17 muestra el acoplamiento de las resistencias calefactoras dentro del tanque. En la Figura 4.18 se muestra el acoplamiento del sensor y del agitador. Se puede observar que al agitador se le adicionaron dos paletas de palas curvas (color negro), las cuales ayudan a producir una mayor mezcla del agua dentro del tanque. Finalmente, se muestra el montaje de todos los componentes en la Figura 4.19.



Figura 4.17. Ubicación del agitador y las resistencias

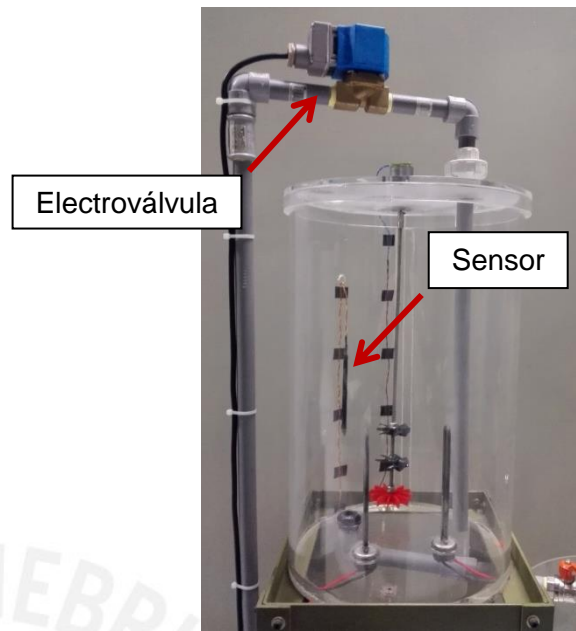


Figura 4.18. Ubicación de la electroválvula y el sensor

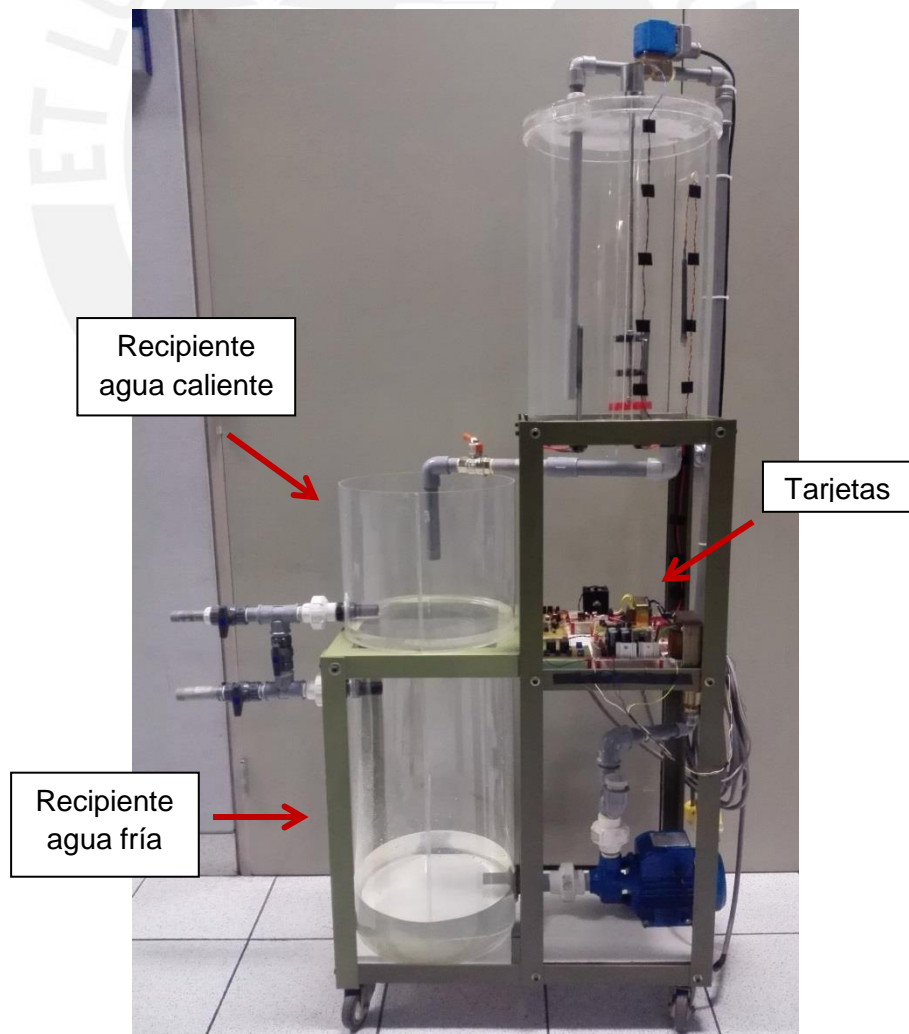


Figura 4.19. Montaje de todos los elementos mecánicos en el módulo educativo

4.3. Costos

RESUMEN	Costo S/.
Sistema Mecánico	2,975.00
Sistema Eléctrico y Electrónico	367.00
Hardware y Software de control	9,800.00
Horas de Ingeniería, Implementación, Programación y Pruebas	13,200.00
TOTAL	26,342.00

Tabla 4.1. Costo total del proyecto

Cantidad	Detalles	Precio Unitario S/.	Precio Total S/.
SISTEMA MECÁNICO			
1	Módulo educativo control de nivel	2,600.00	2,600.00
2	Resistencia calefactora	40.00	80.00
1	Varilla 1/4" + paletas	15.00	15.00
2	Tanques de acrílico	70.00	140.00
1	Soportería para tanques + pernos + tuercas	50.00	50.00
3	Válvula plástica 1/2" + niples + uniones	30.00	90.00
SUB-TOTAL			2,975.00
SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO			
4	Pila recargable AA 2500 mAh + portapila	15.00	60.00
1	Microcontrolador ATmega8	25.00	25.00
1	Transformador 220VAC, 25VA, 15-0-15 VAC	20.00	20.00
6	Cable calibre 16 x metro	4.50	27.00
3	Disipador + ventilador plástico + enchufe 15A	25.00	75.00
1	Motor DC 1.8W	35.00	35.00
1	Placa fibra de vidrio + baquelita	25.00	25.00
1	Conjunto de componentes mayores (triac, optotriac, MOSFET, optoacoplador, comparador, amplificador, fusible para tarjeta, zócalos para integrados)	65.00	65.00
1	Conjunto de componentes menores (resistencias, diodos, potenciómetros, condensadores, transistores, pulsador para tarjeta, borneras)	35.00	35.00
SUB-TOTAL			367.00
HARDWARE Y SOFTWARE DE CONTROL			
1	PC 4GB Memoria RAM, HD 500GB, Procesador Intel Core i5, 2.5 Ghz. Windows 7	3,000.00	3,000.00
1	Licencia Base Software LabVIEW	5,000.00	5,000.00
1	DAQ NI USB-6009	1,800.00	1,800.00
SUB-TOTAL			9,800.00
HORAS DE INGENIERÍA, IMPLEMENTACIÓN, PROGRAMACIÓN Y PRUEBAS			
80	Horas de Ingeniería	65.00	5,200.00
56	Horas de Implementación	35.00	1,960.00
40	Horas de Programación	95.00	3,800.00
32	Horas de Pruebas	70.00	2,240.00
SUB-TOTAL			13,200.00

Tabla 4.2. Detalle de costos del proyecto

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan las pruebas de los circuitos de acondicionamiento y se verifica que operen correctamente. Además se muestran los resultados del funcionamiento del controlador con diferentes valores en los parámetros de sintonización. Esto con la finalidad de observar las diferencias en el comportamiento de la respuesta del sistema.

5.1. Pruebas en el circuito de acondicionamiento para el sensor de temperatura

La siguiente figura muestra la existencia de ruido en la salida del sensor de temperatura antes de conectarlo al circuito de acondicionamiento. Se observa que para las frecuencias de 1.75 KHz y 3.25 KHz existe ruido de magnitud de 17 dB y 11 dB respectivamente.

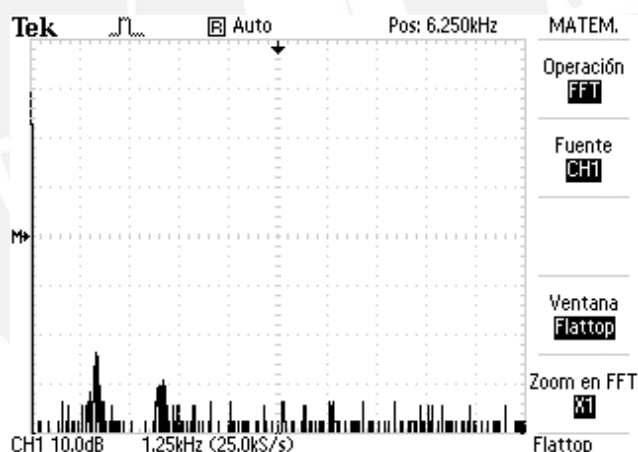


Figura 5.1. Medición del sensor a 22 °C

Para disminuir la magnitud del ruido sin atenuar la señal de salida del sensor se implementó el circuito de amplificación y filtrado mediante la tarjeta de acondicionamiento que se muestra a continuación:

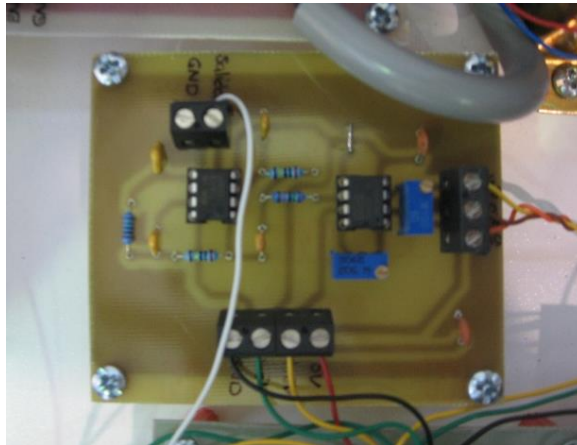


Figura 5.2. Tarjeta de acondicionamiento

Luego de conectar el sensor a la tarjeta de acondicionamiento se obtiene los siguientes resultados:

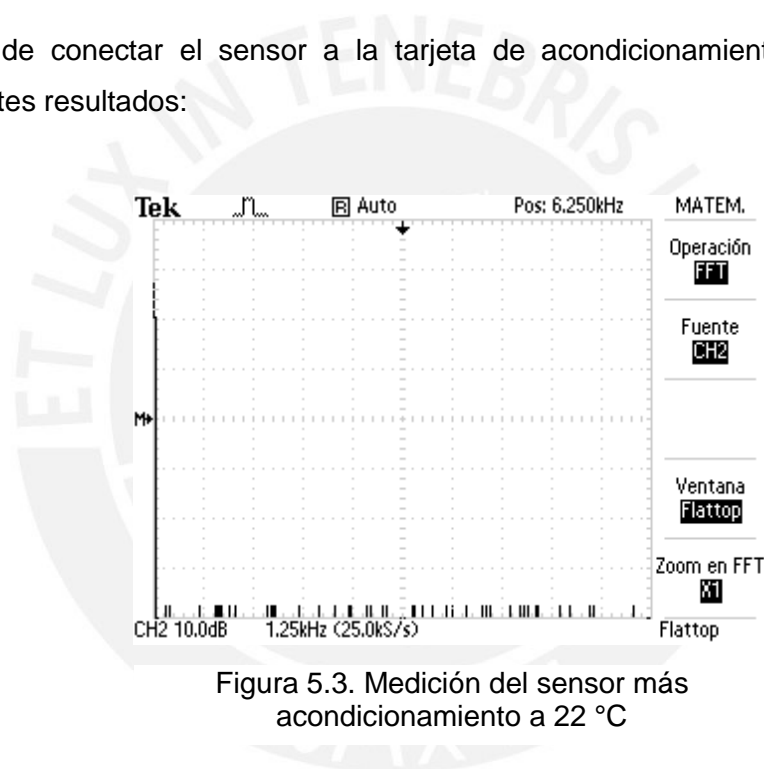


Figura 5.3. Medición del sensor más acondicionamiento a 22 °C

Se puede apreciar claramente la atenuación del nivel de ruido a 2 dB para todas las frecuencias mayores a 0.1 KHz manteniendo la misma magnitud en la señal de salida del sensor.

5.2. Pruebas en el circuito de acondicionamiento para la resistencia calefactora

Se realizaron pruebas en las diferentes etapas que conforman el control de potencia.

5.2.1. Pruebas en el detector de cruce por cero

La Figura 5.4 muestra una imagen de la tarjeta implementada para el detector de cruce por cero.

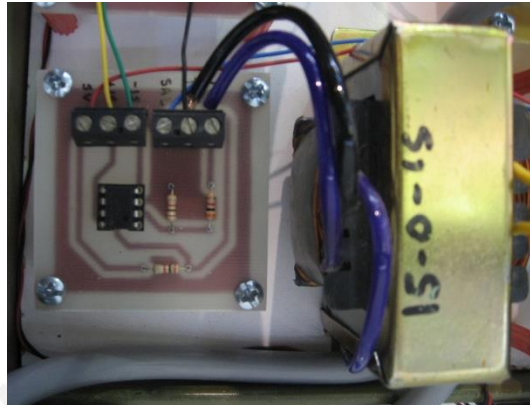


Figura 5.4. Tarjeta para el detector de cruce por cero

En la Figura 5.5 se aprecia las formas de onda en la entrada y la salida en la tarjeta implementada.

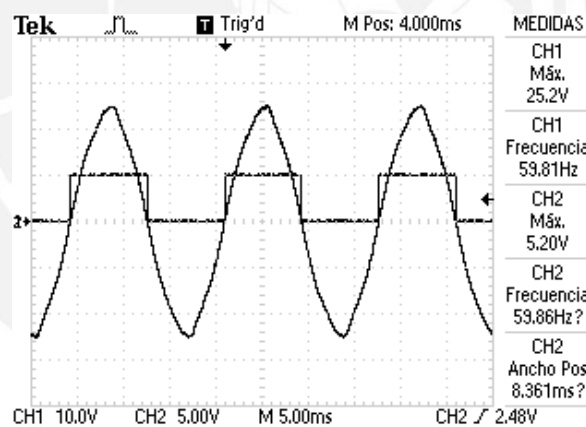


Figura 5.5. Medición a la entrada y a la salida del detector de cruce por cero

Se observa que la señal de salida del circuito detector de cruce por cero tiene forma de onda cuadrada con tiempos de subida y bajada mínimos, lo cual proporciona una sincronización adecuada para la activación del TRIAC. Además esta señal se encuentra dentro del rango de voltaje aceptado por el microcontrolador, por lo que puede ser leída sin inconvenientes por una de sus entradas digitales.

5.2.2. Pruebas en la generación de la señal de activación del TRIAC

Como se mencionó en el capítulo anterior, se ha utilizado un microcontrolador para la generación de la señal de activación del TRIAC. La tarjeta implementada se puede apreciar en la Figura 5.6.

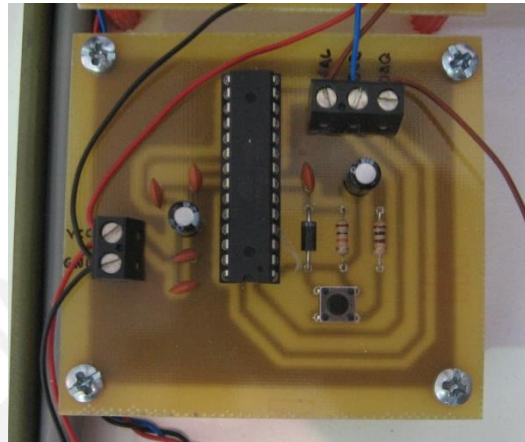


Figura 5.6. Tarjeta para generar la señal de activación en el TRIAC

A continuación se presentan imágenes de la señal de salida del microcontrolador y su relación con la del detector de cruce por cero.

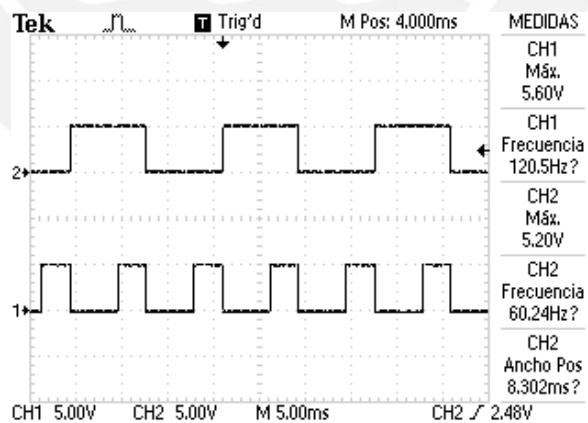


Figura 5.7. Señales del detector de cruce por cero y del microcontrolador para $V_{IN} = 1.5 V$

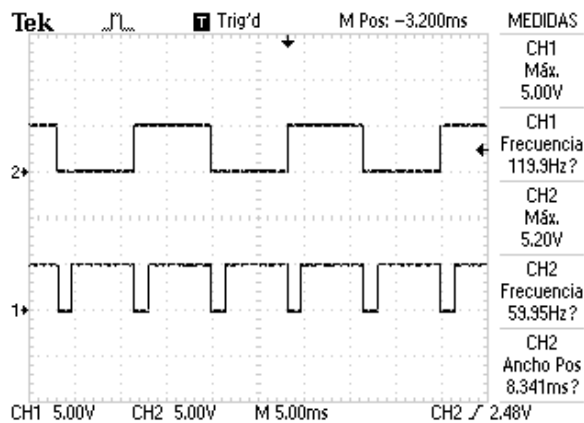


Figura 5.8. Señales del detector de cruce por cero y del microcontrolador para $V_{IN} = 4\text{ V}$

Se puede observar la sincronización de ambas señales en cada cambio de estado de la proveniente del detector de cruce por cero. Asimismo, la variación del ángulo de disparo para diferentes valores en el voltaje de entrada.

5.2.3. Pruebas en el circuito para el control de potencia

Las tarjetas que se implementaron para el control de potencia de las resistencias calefactoras se muestran en la Figuras 5.9 y 5.10.

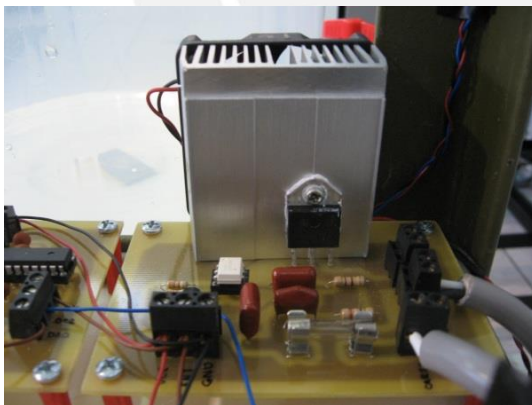


Figura 5.9. Tarjeta de potencia para la primera resistencia calefactora



Figura 5.10. Tarjeta de potencia para la segunda resistencia calefactora

Durante las pruebas iniciales de estos circuitos con las resistencias calefactoras se notó un calentamiento excesivo en los TRIACs, por lo cual se realizó el cálculo del disipador en base a la potencia que disipa el TRIAC. Para ello se tomó como referencia el siguiente dato:

- Corriente máxima de operación más factor de diseño de 1.5 (I_{RMS}) = 13.64 A

Aproximando este valor de corriente en la gráfica de máxima disipación de potencia en función de la corriente RMS obtenida de la hoja de datos del fabricante ST Microelectronics [27]:

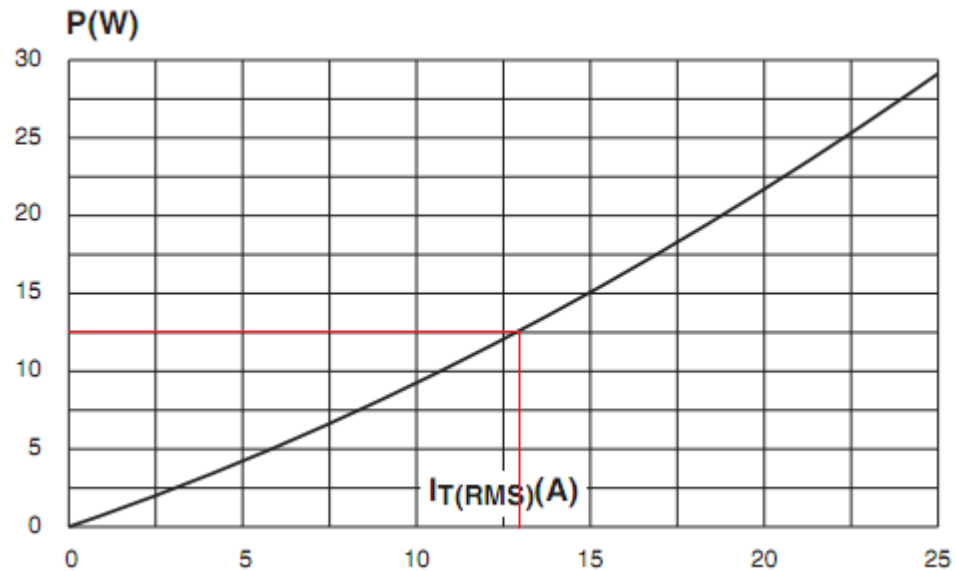


Figura 5.11. Curva de máxima disipación de potencia (W) vs corriente RMS (A)

Se obtiene que la máxima potencia a disipar en cada TRIAC es 12.5 W.

Por lo tanto, para el cálculo del disipador en cada TRIAC se tomó en cuenta la siguiente información:

- Potencia a disipar (P) = 12.5 W
- Resistencia térmica entre la unión y la cápsula ($R_{th_{j-c}}$) = 0.6 °C/W
- Rango de temperatura en operación de la unión (T_j): -40 °C a 125 °C
- Resistencia térmica entre la cápsula y el disipador ($R_{th_{c-d}}$) para uniones mediante silicona térmica = 1 °C/W
- Temperatura ambiente (T_a) = 25 °C
- Temperatura máxima de la unión en operación (T_j) = 70 °C

Reemplazando valores en la ecuación 16 de la ley de ohm térmica [28]:

$$R_{th_{d-a}} = \frac{T_j - T_a}{P} - (R_{th_{j-c}} + R_{th_{c-d}}) \quad (21)$$

$$Rth_{d-a} = \frac{70 - 25}{12.5} - (0.6 + 1)$$

$$Rth_{d-a} = 2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Se obtiene que el disipador a escoger debe tener como máximo una resistencia térmica de 2 °C/W. Sin embargo, debido a su bajo costo y ser más comerciales en el mercado local, se adquirieron disipadores con una resistencia térmica de aproximadamente 4 °C/W. A estos se les adicionó un ventilador para reducir su resistencia por convección forzada a un valor cercano a 1.5 °C/W. Con esto se asegura que los TRIACs funcionen adecuadamente y no excedan la temperatura máxima de operación.

En las Figuras 5.12 y 5.13 se muestran las pruebas realizadas con dos focos incandescentes de 75 W cada uno para comprobar la variación en la potencia recibida en la carga.

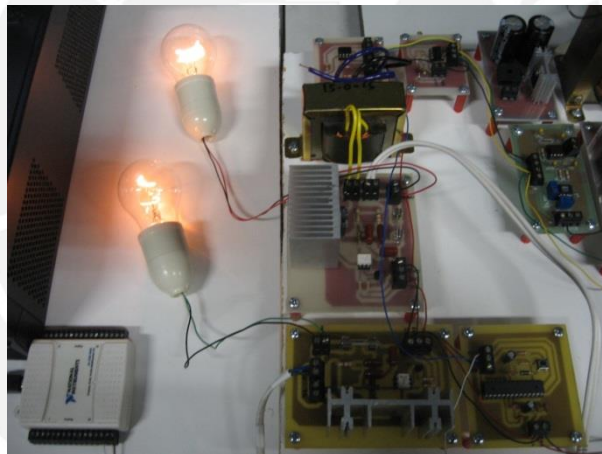


Figura 5.12. Potencia recibida en la carga para $V_{IN} = 1.5 \text{ V}$

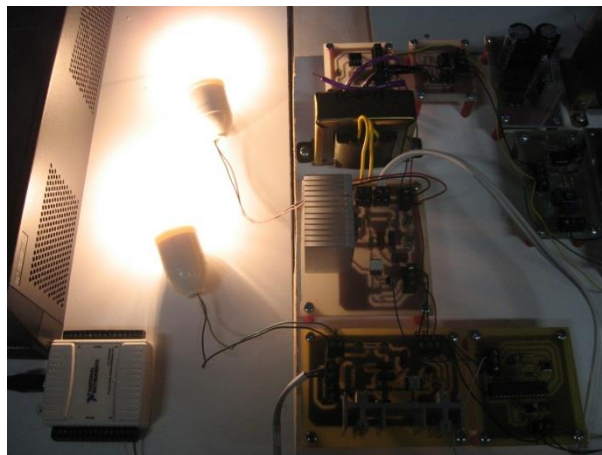


Figura 5.13. Potencia recibida en la carga para $V_{IN} = 4 \text{ V}$

Se puede observar la variación en la potencia mediante el cambio en la intensidad de luz producida por los focos. Se resalta que para esta prueba no se utilizaron los ventiladores puesto que los focos, a diferencia de las resistencias, no consumían una gran cantidad de corriente.

5.3. Pruebas en el circuito de activación del agitador

La tarjeta que se llevó a cabo para la activación del agitador se muestra en la Figura 5.14.

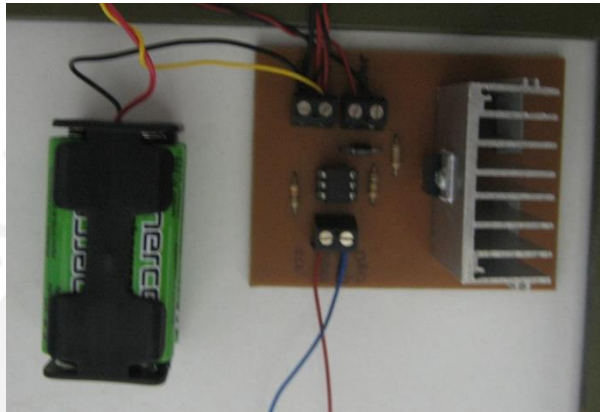


Figura 5.14. Tarjeta para la activación del agitador

Se puede notar que la fuente del agitador proviene de 4 pilas AA de 2500 mAh cada una. Una vez implementada la tarjeta se realizaron las mediciones mencionadas en la Tabla 5.1 para comprobar su funcionamiento.

- Voltaje total entregado por las pilas: 5.3 VDC

	MOSFET	
	Corte	Saturación
V_{GS}	0.14 VDC	5.12 VDC
V_{DS}	5.18 VDC	0.5 VDC
I_{DS}	10 μ A	370 mA

Tabla 5.1. Valores obtenidos en la tarjeta de activación del agitador

Entonces,

$$Potencia\ eléctrica_{motor} = (5.3 - 0.5) * 0.37$$

$$Potencia\ eléctrica_{motor} = 1.776\ W$$

5.4. Pruebas de linealidad en la resistencia calefactora

La siguiente gráfica se obtuvo variando el porcentaje de activación del TRIAC y midiendo el voltaje que finalmente recibe la carga. Luego se halla la potencia mediante la siguiente relación:

$$R_{calefactora} = 30.2 \Omega$$
$$P_{eléctrica} = \frac{(V_{rms})^2}{R_{calefactora}} W \quad (22)$$

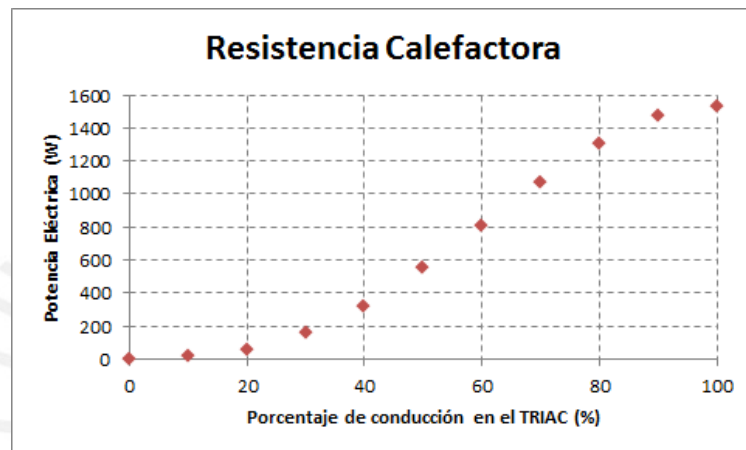


Figura 5.15. Relación entre potencia y conducción en TRIAC de 0 a 100%

Se puede observar que el comportamiento de la potencia en la resistencia calefactora no es lineal dentro del rango de operación de 0 a 100%. Por lo tanto, para trabajar dentro de la zona lineal se restringe el rango de operación de la resistencia entre 20 y 80%. Esto se puede comprobar en la siguiente figura.

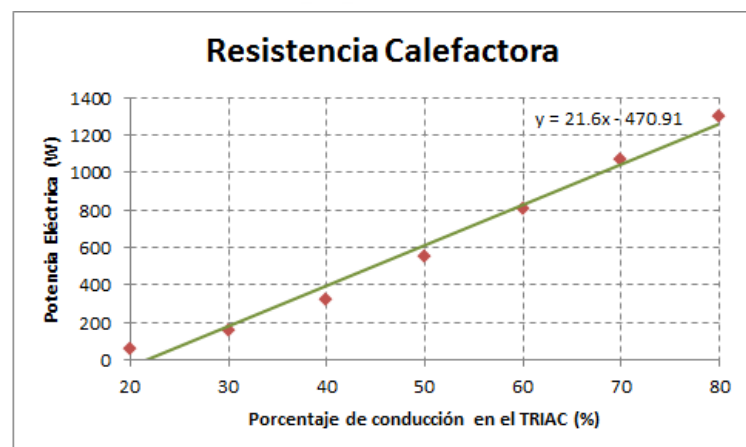


Figura 5.16. Relación entre potencia y conducción en TRIAC de 20 a 80 %

5.5. Resultados del funcionamiento del controlador

Se implementó el algoritmo de control PID en LabVIEW y se desarrolló la interfaz de usuario que se muestra en la Figura 5.17.

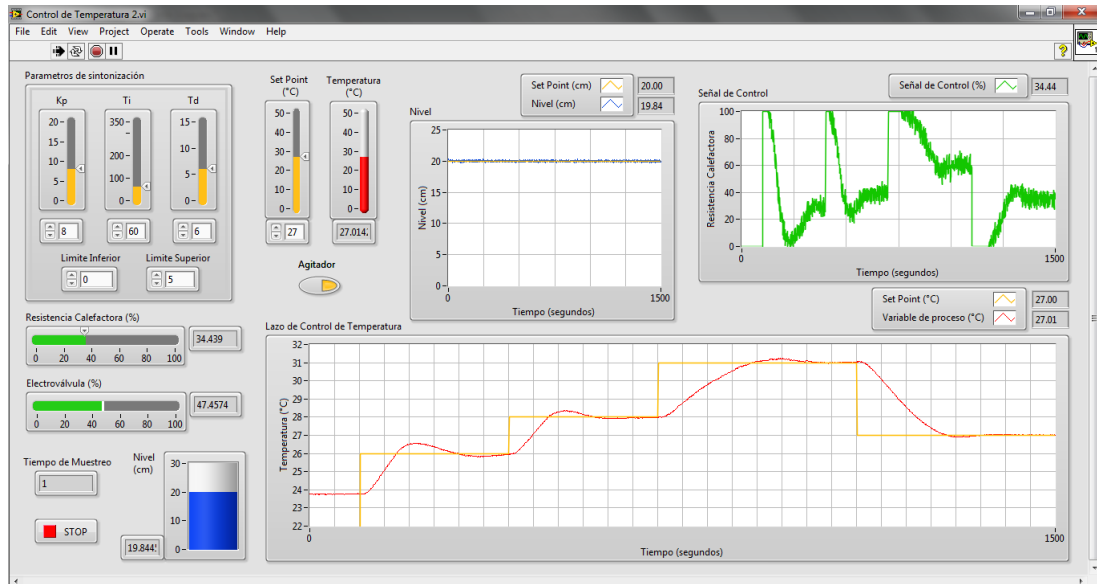


Figura 5.17. Interfaz de usuario implementada en LabVIEW

En la parte superior izquierda se ingresan los parámetros de sintonización del controlador PID, sus límites de salida y el nivel de referencia deseado (Set Point). Se cuenta además con 2 botones: el botón "Agitador" que permite controlar su encendido o apagado y el botón "STOP" con el cual se detiene el proceso. Se dispone además de 2 gráficas que muestran el comportamiento en el tiempo de la señal de control, el nivel de referencia y la variable de proceso. Dado que el sistema requiere que se trabaje con un nivel de agua casi constante, se colocó también una gráfica donde se puede visualizar la variable de nivel en el tiempo y así monitorear que se mantenga en un valor determinado. Finalmente, se incluyó un indicador para visualizar el periodo muestreo del controlador.

En el diagrama de bloques de la Figura 5.18 se puede apreciar el algoritmo de control implementado en LabVIEW.

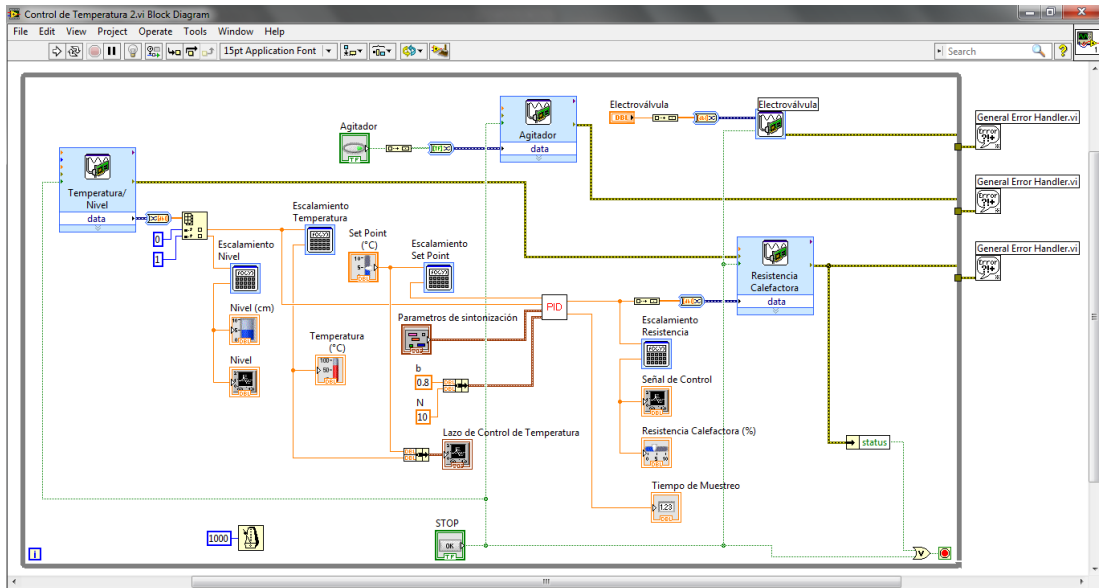


Figura 5.18. Algoritmo de control implementado en LabVIEW

En primer lugar, se sintonizó el controlador con los parámetros obtenidos en el capítulo 3. En base a estos parámetros, que se muestran a continuación, se realizó un cambio en la referencia a 28 °C. La imagen de la Figura 5.19 muestra el resultado obtenido.

$$K_p = 8 \quad T_i = 292 \quad T_d = 8 \quad b = 0.8 \quad N = 10$$

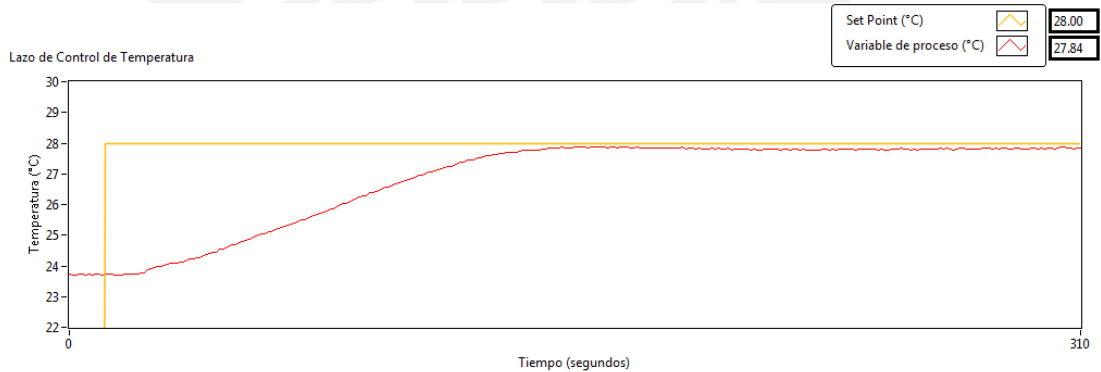


Figura 5.19. Respuesta real de la planta para un Set Point de 28 °C

Se puede apreciar que la respuesta se estabilizó cerca de los 300 segundos, sin sobreimpulso y con un error en estado estable de aproximadamente 0.2 °C. Este comportamiento se asemeja al obtenido durante la simulación del sistema en el software Simulink mostrado en la Figura 3.22. Dado que el proceso de control de temperatura es lento, el efecto de la acción derivativa no es significativo. Por ello, para las siguientes pruebas se mantuvo el tiempo derivativo en su valor inicial de 8.

Para la siguiente prueba, se disminuyó a 100 el valor del tiempo integral con la finalidad de eliminar el error en estado estable. La Figura 5.20 muestra el resultado obtenido:

$$K_p = 8 \quad T_i = 100 \quad T_d = 8 \quad b = 0.8 \quad N = 10$$

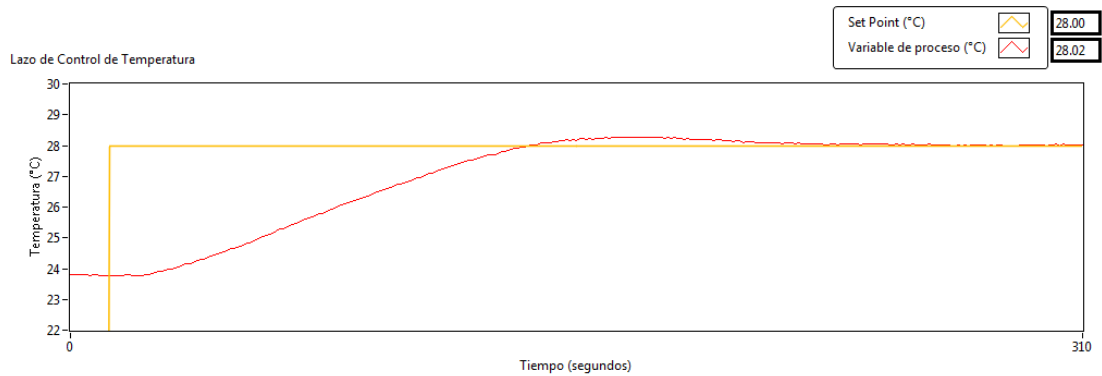


Figura 5.20. Respuesta real de la planta para un Set Point de 28 °C

En este caso se puede observar una mejora en la respuesta al eliminar el error en estado estable. Sin embargo, ahora la respuesta presenta un sobreimpulso de aproximadamente 0.3°C y un tiempo de establecimiento de 300 segundos.

Para la última prueba, se aumentó a 200 el valor del tiempo integral con la finalidad de reducir el sobreimpulso. La Figura 5.21 muestra los resultados obtenidos:

$$K_p = 8 \quad T_i = 200 \quad T_d = 8 \quad b = 0.8 \quad N = 10$$

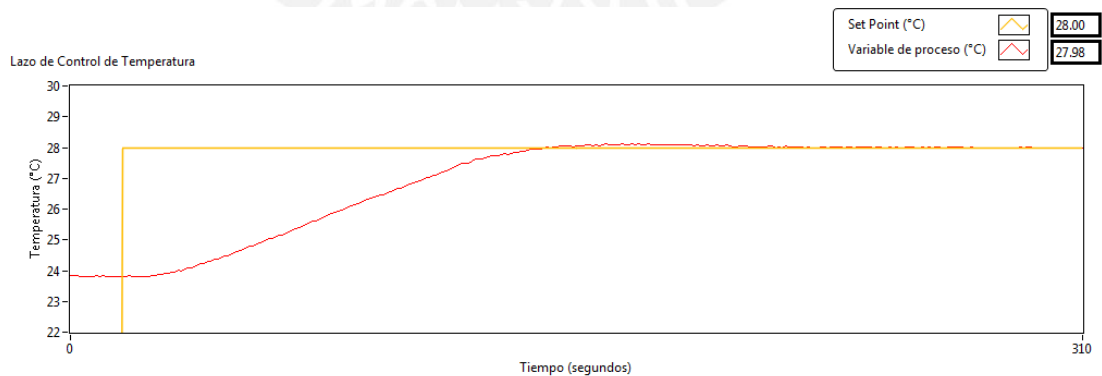


Figura 5.21. Respuesta real de la planta para un Set Point de 28 °C

En esta prueba se obtuvieron los mejores resultados consiguiendo eliminar el sobreimpulso en la respuesta, un error en estado estable de cero y manteniendo el tiempo de establecimiento de 300 segundos.

5.6. Guía práctica para la elaboración de pruebas de control con el módulo de temperatura

A continuación se detalla el proceso para la elaboración de las pruebas de control con el módulo de temperatura.

5.6.1. Identificación de los equipos para el control de temperatura

Como primer paso, se tiene que realizar una identificación de todos los equipos que forman parte del proceso de control de temperatura. Esto debe realizarse en base al diagrama P&ID mostrado en la Figura 3.3. Los equipos principales a tomar en cuenta son: la bomba de agua, el sensor de temperatura, las resistencias calefactoras y el agitador.

Aquí también es importante identificar el hardware y el software que son necesarios para desarrollar la lógica de control. Estos equipos son: la tarjeta de adquisición de datos, la computadora y el software LabView.

5.6.2. Consideraciones iniciales y puesta en marcha del módulo

A continuación se indican los accionamientos previos que deberán realizarse para dejar el módulo preparado para las pruebas.

- Encender la fuente de alimentación del circuito de control y potencia. Para ello deberá conectarse el enchufe del transformador de potencia y accionar el interruptor de encendido.
- Abrir las válvulas manuales de ingreso (V-06) y salida (V-05) de agua al módulo. Asegurarse que la válvula manual V-04 se encuentre cerrada.
- Abrir a un 50% la electroválvula de ingreso de agua al tanque de proceso (LCV-01). Para ello deberá abrirse el programa “Lazo abierto.vi” y escribir en la variable Electroválvula el valor de 50. Asegurarse además que el valor de la variable Resistencia Calefactora sea 0.
- Abrir la válvula manual V-02 y encender la bomba de alimentación de agua. Para ello deberá conectarse el enchufe de la bomba.
- Abrir la válvula manual de descarga del tanque de proceso (V-03) hasta mantener un nivel constante de agua por encima de las resistencias calefactoras.

- Conectar los enchufes de las resistencias calefactoras.
- Encender el agitador accionando su interruptor de encendido.

5.6.3. Determinación del rango lineal de proceso

En esta parte se deberá obtener el rango lineal de operación del módulo de temperatura en base a su respuesta en lazo abierto. Para ello se deberán seguir los siguientes pasos:

- Abrir el programa “Lazo Abierto.vi” (Anexo 1).
- Asegurarse que el valor de la variable Resistencia Calefactora se encuentre en 0 y tomar nota del valor de la variable de proceso (temperatura).
- Colocar en la variable Resistencia Calefactora el valor de 10%, esperar que la variable de temperatura sea estable y tomar nota.
- Repetir el paso anterior para valores de Resistencia Calefactora de 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100%. Tomar nota de las temperaturas estables para cada uno de los puntos.
- Graficar la curva de valores de “Resistencia Calefactora” vs. “Temperatura” y determinar el rango lineal del proceso.

5.6.4. Identificación del modelo matemático del proceso

En esta parte se identificará el modelo matemático del proceso utilizando la prueba del escalón en lazo abierto. El escalón será representado por un cambio brusco del valor de Resistencia Calefactora y deberá analizar la respuesta de la variable de proceso (temperatura) para validar su comportamiento como un sistema de primer orden con retardo puro, de acuerdo a lo hallado en el punto 3.5.2. Para ello se deberán seguir los siguientes pasos:

- Abrir el programa “Lazo Abierto.vi” (Anexo 1).
- Asegurarse que el valor de la variable Resistencia Calefactora se encuentre en 0.
- Colocar en la variable Resistencia Calefactora el valor de 50% y analizar el comportamiento de la variable temperatura. Asegurarse de guardar esta gráfica ya que se utilizará posteriormente para la sintonización del controlador PID.

- Validar el comportamiento como un sistema de primer orden con retardo puro.
- Determinar los valores de las constantes de la función de transferencia (modelo matemático) en base al comportamiento obtenido.
- Validar del modelo matemático obtenido. Para ello se deberá utilizar el software Simulink y comprobar la respuesta de la función de transferencia a una entrada escalón.

5.6.5. Sintonización del controlador PID

En esta parte se determinarán los valores de los parámetros del controlador PID utilizando el método de Ziegler-Nichols en lazo abierto. Para ello se deberán seguir los siguientes pasos:

- Abrir la gráfica guardada en el paso anterior del comportamiento de la variable temperatura para un cambio de 50% en el valor de Resistencia Calefactora.
- En base a esta gráfica, determinar los valores de las constantes “R” y “L” de la aproximación del método de Ziegler-Nichols.
- Calcular los valores de los parámetros del controlador PID (K_p , T_i y T_d) utilizando el método de Ziegler-Nichols.
- Utilizar el software Simulink para comprobar la sintonización del sistema en lazo cerrado. Para ello, emplear el modelo matemático hallado anteriormente y colocar en el bloque PID los parámetros calculados. De ser necesario, ajustar los valores de los parámetros para mejorar la respuesta.
- Abrir el programa “Control de Temperatura.vi” (Figuras 5.17 y 5.18).
- Colocar los valores de los parámetros K_p , T_i y T_d , validados o mejorados durante la simulación, en el recuadro “parámetros de sintonización”.
- Colocar valores de “Set Point” dentro del rango lineal del proceso y verificar la respuesta del proceso controlado analizando el porcentaje de sobreimpulso, tiempo de establecimiento y error en estado estable.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló satisfactoriamente el diagrama de proceso e instrumentación (P&ID) de un sistema de control de temperatura para el equipo control de nivel del CETAM. Este diagrama permitió de elaborar la memoria de funcionamiento del sistema y obtener el listado de sensores y actuadores requeridos para la implementación.
- Se seleccionó correctamente el sensor de temperatura, las resistencias calefactoras, el agitador y la tarjeta de adquisición de datos en base a los requerimientos del sistema determinados y a la evaluación de diferentes soluciones que ofrece el mercado local por cada uno.
- Se implementaron con éxito los circuitos de acondicionamiento para el sensor de temperatura, las resistencias calefactoras y el agitador. Estos permitieron tener una lectura precisa del sensor al pasar por las etapas de amplificación y filtrado. Además, hicieron posible el control de potencia de las resistencias calefactoras mediante una salida analógica de la tarjeta de adquisición de datos.
- 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 con retardo puro. Además, se validó el modelo obtenido haciendo uso del software Matlab (Simulink).
- Se implementó correctamente el algoritmo de control PID discreto en el software LabVIEW consiguiendo alcanzar los requerimientos de diseño de sobrepulso, tiempo de establecimiento y error en estado estable.
- Se consiguió desarrollar una interfaz de usuario intuitiva y funcional en el software LabVIEW que permite variar la referencia y sintonizar los parámetros del controlador PID de manera sencilla. Además, proporciona las gráficas del comportamiento en el tiempo de las variables de control y de proceso del sistema para un mayor análisis del lazo de control.

RECOMENDACIONES

- Para evitar grandes pérdidas de agua durante la realización del proceso, es recomendable implementar un sistema de recuperación y enfriamiento de agua que consiga mantener su temperatura de ingreso al sistema constante. Otra alternativa es instalar directamente en el tanque de proceso un equipo que enfríe el agua como por ejemplo celdas peltier.
- Se recomienda agregar en la programación del lazo de control una condición para mantener sin tensión las resistencias calefactoras mientras estas no hayan sido totalmente cubiertas con agua, de esta manera se evitará su deterioro.
- Para obtener una respuesta adecuada del sistema es necesario que durante las pruebas se mantenga la válvula manual de salida del tanque de proceso en una posición fija, puesto que un cambio en ella significaría una variación en el modelo matemático de la planta.
- Se recomienda realizar una limpieza periódica del tanques de agua con el fin de evitar suciedad, hongos y obstrucción en las tuberías que puedan afectar el flujo normal del agua.
- Una mejora que se puede realizar a este sistema es aplicar conceptos de control multivariable, consiguiendo con un mismo controlador mantener los niveles deseados de nivel y temperatura dentro del tanque de proceso.
- Se recomienda adicionar al módulo educativo nuevos lazos de control para las variables de flujo y presión. Esto le otorgará al módulo mayor flexibilidad y el alumno podrá realizar con un mismo equipo pruebas de control con las 4 variables más comunes en la industria actual que son: nivel, temperatura, flujo y presión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tecnología educativa S.A.
2015 *Instrumentación y control de procesos*. Córdoba: Tecnología educativa S.A.
Consulta: 08 de septiembre de 2015.
< <http://www.tecnoedu.com> >
- [2] US Didactic, Inc.
2015 *Simple Process Engineering Control Systems*. Florida: US Didactic, Inc.
Consulta: 08 de septiembre de 2015.
< <http://www.usdidactic.com> >
- [3] Edibon Internacional.
2015 *Control de procesos. Principios*. Madrid: Edibon Internacional. Consulta: 08 de septiembre de 2015.
< <http://www.edibon.com> >
- [4] HFT Education.
2015 *Process Control*. Derby: HFT Global Ltd. Consulta: 08 de setiembre de 2015.
< <http://www.hft-education.com> >
- [5] OJEDA, A.
2014 *Módulo didáctico de control de nivel para laboratorio de automatización de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo. Guayaquil.
- [6] CÉSAR, J., SÁNCHEZ, R., ESCUDERO, M.
2012 *Módulo didáctico para control y monitoreo de 3 variables nivel, temperatura, presión, implementado con sensores, PLC FlexLogix y SCADA Factory Talk (Allen Bradley)*. Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingenierías. Guayaquil.
- [7] OLLERO, Anibal.
1991 *Control por computador: descripción interna y diseño óptimo*. Barcelona: Marcombo, S.A.

- [8] DORF, Richard.
2005 *Sistemas de control moderno*. Décima edición. Madrid: Pearson Educación.
- [9] KUO, Benjamin.
1996 *Sistemas de control automático*. Séptima edición. México D.F.: Pearson Education
- [10] CARRANZA, Raymundo
2005 *Tópicos de instrumentación y control*. [documento]. Material de enseñanza. Lima: Pontificia Universidad católica del Perú, Ciencias e ingeniería.
- [11] MARCOS, Mari-Carmen
2001 *HCI (human computer interaction): concepto y desarrollo*. Oxford, volumen 10, número 6, pp. 4-16. Consulta: 12 Setiembre de 2011.
< <http://www.elprofesionaldelainformacion.com/contenidos/2001/junio/1.pdf> >
- [12] ORDOÑEZ, Joseph
2011 *Implementación de un módulo de control de nivel y temperatura*. Lima. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ingeniería Electrónica.
- [13] HADZICH, Miguel
2008 *Tablas de termodinámica de fluidos y transferencia de calor*. Lima. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ingeniería Electrónica.
- [14] Digi-Key Electronics.
2016 *Temperature Sensors, Transducers*. Minessota: Digi-Key Electronics.
Consulta: 20 de junio de 2016.
<<http://www.digkey.com/product-search/en/sensors-transducers/temperature-sensors-transducers/1966391?k=temperature%20sensor>>
- [15] BERZOSA, Martín, MOLINA, Manuel
2010 *Determinación de modelo para evaluar el consumo de potencia en tanques agitados para soluciones pseudoplásticas*. San José, pp. 51-65. Consulta: 16 de octubre de 2011.
<http://www.inii.ucr.ac.cr/base_revistas/index.php/ingenieria/article/download/90/67.>

- [16] Link Industrial, S.L.
2011 *Process Engineering Equipment*. Barcelona: Link Industrial, S.L. Consulta: 16 de octubre de 2011.
<http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/7932/agitadores_2.pdf>
- [17] National Instruments.
2016 *Adquisición de datos multifunción*. Texas: National Instruments. Consulta: 20 de junio de 2016.
<http://sine.ni.com/np/app/main/p/bot/no/ap/daq/lang/es/pg/1/sn/n17:daq,n21:41/sb/+price_d/>
- [18] TAFUR, Julio
2011 *Implementación de controladores PID digitales*. [diapositivas]. Material de enseñanza. Lima: Pontificia Universidad católica del Perú, Ciencias e ingeniería.
- [19] ASTROM, Karl
2002 *Control system design*. San José, pp. 39-52
- [20] TAFUR, Julio
2009 *Diseño de controladores PID_2009-II*. [diapositivas]. Material de enseñanza. Lima: Pontificia Universidad católica del Perú, Ciencias e ingeniería.
- [21] ALFARO, Victor
2005 *Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler y Nichols*. San José, pp. 39-52
- [22] PÉREZ, Eulogio Timoteo
2008 *Discretización de un controlador PID*. Barquisimeto: Universidad Nacional Experimental Politécnica. Consulta: 07 de junio de 2016.
<<http://www.el.bqto.unexpo.edu.ve/etperez/apuntes/PIDdiscreto.htm>>
- [23] PRATT, Hugo
2009 *Capítulo 3: Filtros*. [diapositivas]. Material de enseñanza. Lima: Pontificia Universidad católica del Perú, Ciencias e ingeniería.

- [24] VÁSQUEZ, Jacob J.
2016 *Análisis en el dominio de la frecuencia*. Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca. Consulta: 23 de junio de 2016.
<http://www.utm.mx/~jvasquez/ddcontrol4_08.pdf>
- [25] SÁNCHEZ, Jose Acedo
2013 *Instrumentación y control avanzado de procesos*. Libro Electrónico. Madrid D.F.: Diaz de Santos
- [26] MALONEY, Timothy J.
2006 *Electrónica Industrial Moderna*. Quinta edición. México D.F.: Pearson Education
- [27] Digi-Key Electronics.
2016 *Triacs*. Minessota: Digi-Key Electronics. Consulta: 20 de junio de 2016.
<<http://www.digikey.com/product-search/es/discrete-semiconductor-products/thyristors-triacs/1377581?k=bta26>>
- [28] TRUJILLO, F., POZO, A., TRIVIÑO, A.
2011 *Cálculo de disipadores de calor*. Málaga: Universidad de Málaga. Consulta: 20 de junio de 2016.
<http://ocw.uma.es/ingenierias/electronica-de-potencia/ejercicios-proyectos-y-casos-1/calculo_de_disipadores.pdf>