

SINTONIZACIÓN DE LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA EN EL HERVIDOR DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN

TUNING OF TEMPERATURE CONTROL LOOP IN THE BOILER OF A DISTILLATION COLUMN

Florencio Javier Pérez Núñez

Tecnológico Nacional de México en Celaya
fjpn@iqcelaya.itc.mx

José Guadalupe Zavala Villalpando

Tecnológico Nacional de México en Celaya
jg.zavala@itcelaya.edu.mx

Oscar Michael Montoya Vallejo

Tecnológico Nacional de México en Celaya
moscarmichael@ymail.com

Resumen

En este trabajo se explica cómo se desarrolló la metodología para la implementación y sintonización de un control de temperatura del hervidor de una de las columnas de destilación del Tecnológico Nacional de México en Celaya. Primeramente, se investigó su funcionamiento general, posteriormente se realizó mantenimiento para garantizar su correcto funcionamiento. Se efectuó el acondicionamiento de señales y después el montaje del controlador en el gabinete de la planta. Finalmente se desarrolló la sintonización. Con ello la planta piloto funciona correctamente para las prácticas de laboratorio y puede operarse de manera automática la temperatura del hervidor.

Palabra(s) Clave: Columna de Destilación, Control de Temperatura, Sintonización.

Abstract

This paper explains how the methodology for the implementation and tuning of a boiler temperature control of one of the distillation columns of the Tecnológico

Nacional de Mexico en Celaya was developed. Firstly, its general operation was investigated, then maintenance was carried out to guarantee its correct operation. The signals were conditioned and then the controller was assembled in the plant's cabinet. Finally, the tuning was developed. With this, the pilot plant works correctly for laboratory practices and the temperature of the boiler can be operated automatically.

Keywords: *Distillation Column, Temperature Control, Tuning.*

1. Introducción

En los programas educativos de las ingenierías del Tecnológico Nacional de México en Celaya, la realización de prácticas con equipo de laboratorio y prototipos didácticos es fundamental si se quiere consolidar los conceptos adquiridos en el aula y el autoaprendizaje.

Por otro lado es importante mencionar que inicialmente la columna de destilación estaba fuera de operación por fallas electrónicas, es por ello que fue de suma importancia ponerla en funcionamiento.

La destilación es una de las operaciones básicas más importantes de la industria química y permite separar los componentes de una mezcla líquida al estado de sustancias puras. (Vargas, 2016).

En la destilación cerrada el vapor producido permanece en contacto con el líquido, de modo que en cada momento pueda considerarse que ambas fases están en equilibrio. Al final de esta destilación todavía queda una cantidad apreciable de componente volátil en el líquido por lo que la separación que produce es muy limitada (Espinal & Jiménez, 2009).

El proceso de rectificación Consiste esencialmente en hacer circular el vapor de una mezcla en contracorriente con el condensado producido a partir del mismo, en un aparato cilíndrico conocido como columna de destilación o rectificación. El intercambio entre ambas faces da lugar a la formación de condensado a expensas del vapor y de vapor a expensas del líquido (Adriano & Valle, 2012).

Una columna de destilación es un recipiente vertical con suficiente altura para que en su interior exista un contacto entre una corriente de vapor y una de líquido.

Éstas columnas se forman por varios dispositivos como platos o empaques estructurados donde se realiza la separación de componentes (Caisa & Sandoval, 2009).

El controlador constituye el elemento fundamental en un sistema de control, pues determina el comportamiento del bucle, ya que condiciona la acción del elemento actuador en función del error obtenido. La forma en que el regulador genera la señal de control se denomina acción de control (Cuji, 2014).

En la acción de control P (proporcional) la señal de accionamiento es proporcional a la señal de error del sistema. En un control proporcional se tendrá lo expresado en la ecuación 1.

$$y(t) = k_p e(t) \quad (1)$$

Llamando $y(t)$ a la señal de salida (salida del controlador), K_p a la constante proporcional y $e(t)$ a la señal de error (entrada al controlador). Una propiedad importante del controlador P es que no puede compensar la señal de error remanente (permanente) del sistema.

La acción de control I (integral) permite anular este error, haciendo que la señal de control, crezca proporcionalmente al producto (error x tiempo). Se puede decir, pues, que un sistema con acción integral tiende a anular el error promedio. La salida de este controlador es el expresado en la ecuación 2.

$$y(t) = k_i \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

Donde k_i es la constante integral. En la práctica no existen controladores que tengan sólo acción integral, sino que llevan combinada una acción proporcional. Estas dos acciones se complementan. La primera en actuar es la acción proporcional (instantáneamente) mientras que la integral actúa durante un intervalo de tiempo.

Así y por medio de la acción integral se elimina la desviación remanente (proporcional). La salida del bloque de control PI responde a la ecuación 3 (Núñez, 2011).

$$y(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

La modulación por ancho de pulsos o PWM (figura 1) es una técnica de modulación en la que se modifica el ciclo de trabajo (Duty Cycle), el cual determina el porcentaje de tiempo que el pulso (o voltaje aplicado) está en estado activo (on) durante un ciclo (Ruiz, 2007).

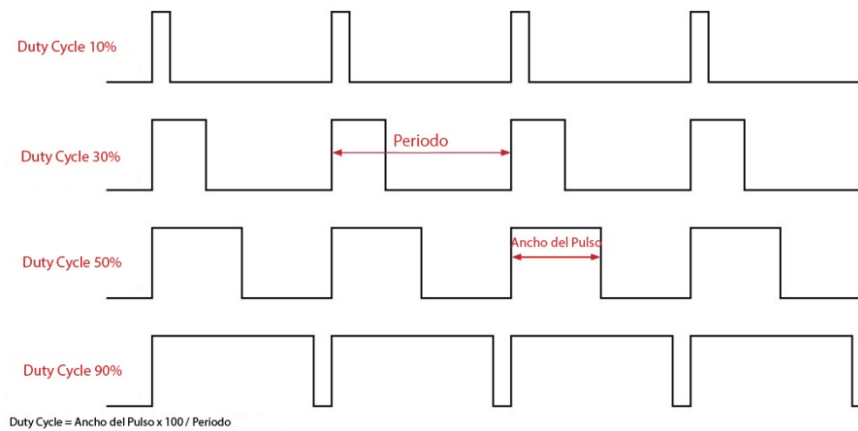


Figura 1 Modulación por ancho de pulso.

La señal PWM se utiliza como técnica para generar una señal analógica. A partir del promedio del voltaje de dicha señal que tiene un determinado porcentaje del ciclo de trabajo. (Estupiñán & Lisca, 2010).

Los objetivos de este trabajo fueron, realizar la rehabilitación de una planta piloto de columna de destilación de empaque estructurado e implementar un sistema de control de temperatura en el hervidor, que se cumplieron satisfactoriamente. Estos objetivos se cubrieron efectuando las reparaciones necesarias y seleccionando el control que cumpla con los requerimientos, para que los alumnos del instituto tecnológico de Celaya puedan realizar sus prácticas de laboratorio.

2. Métodos

Para desarrollar el proyecto de forma adecuada y cumplir con los objetivos se planteó la metodología mostrada en la figura 2, donde las primeras actividades

involucraron el mantenimiento de la columna de destilación para dejarla en su funcionamiento original y posteriormente se realizó la implementación del control de temperatura en el hervidor.

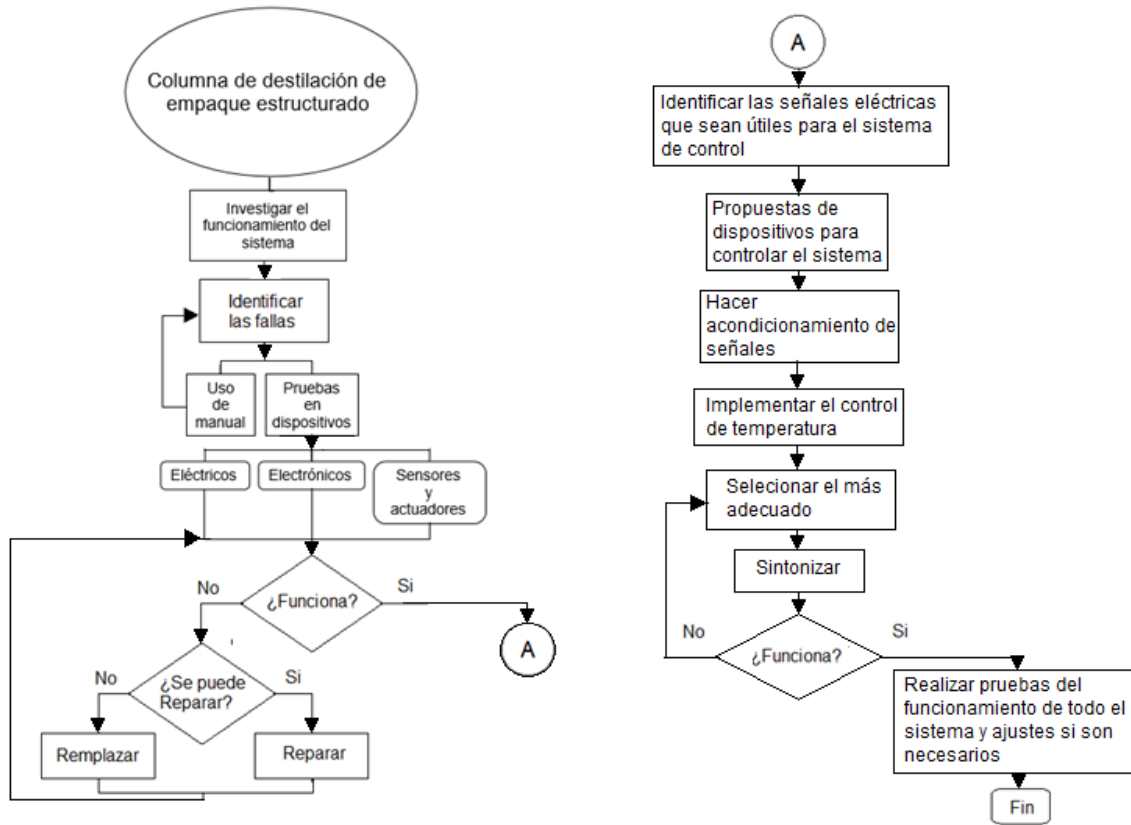


Figura 2 Metodología del proyecto.

Funcionamiento de la planta

El elemento principal de la planta (figura 3) es la columna de vidrio (1) de 50 mm de diámetro y 900 mm de altura, la cual está dividida por tres empaques estructurados de acero inoxidable (8). En cada uno de estos empaques se introduce la alimentación del producto. Cuando la columna está en funcionamiento los empaques permiten el contacto del vapor y el líquido en contracorriente. Las tres secciones de la columna están forradas de un material aislante y una cubierta de acero inoxidable (2) para minimizar la pérdida de calor que sufre el vapor al recorrer la columna.

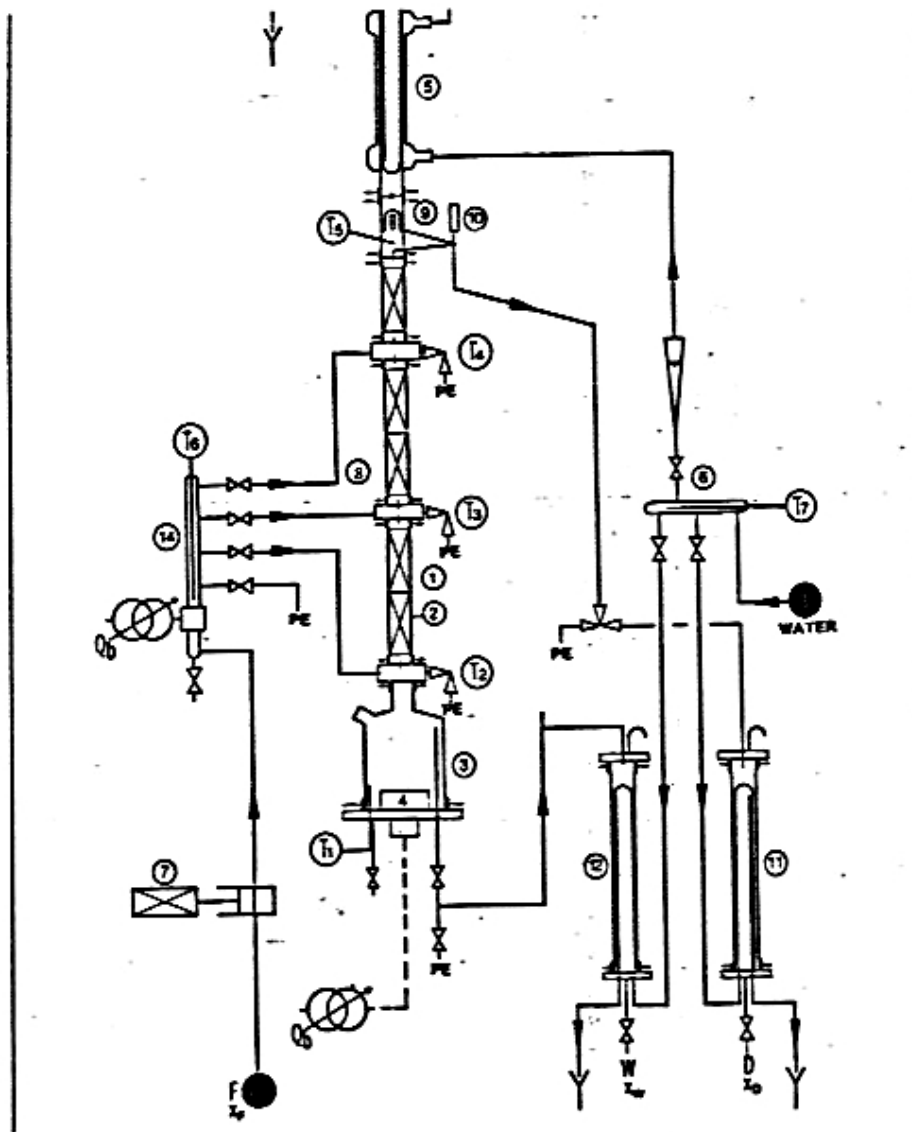


Figura 3 Diagrama de la planta.

La alimentación llega a cada empaque gracias a una bomba peristáltica (7) que la impulsa desde el contenedor. Antes de que el producto llegue a los empaques éste pasa por el conjunto de abastecimiento (14) que contiene un collar calefactor para realizar un precalentado del mismo.

La mezcla se calienta en el hervidor (3) por medio de una resistencia eléctrica de acero inoxidable (4), y los vapores que ascienden por la columna se enfrían en el condensador (5) con un cambiador encamisado de vidrio y un cambiador axial de acero inoxidable que está situado en la parte superior.

El condensado cae hacia la cabeza de reflujo (9) por gravedad, y una vez allí se dirige a la válvula de reflujo (10), la cual puede mandar el condensado de vuelta a la columna o sacarlo como destilado hacia su receptor graduado de destilado (11). Además, cuenta con un receptor graduado de residuo (12) y un circuito de agua de refrigeración.

En cuanto a los dispositivos de control, se incluye un gabinete de control y los termopares, para medir la temperatura.

Identificación de Fallas

Inicialmente la resistencia del hervidor y la bomba dosificadora no trabajaban, después de realizar la verificación del funcionamiento de los dispositivos y las conexiones eléctricas se apreció que la resistencia no operaba por conexiones eléctricas incorrectas. Sin embargo, la bomba presento dos fallas en la tarjeta electrónica, que se dieron solución, la primera fue un capacitor electrolítico que perdió su material dieléctrico (Electrolito) y la segunda un falso contacto en un diodo Zener, que se muestran en la figura 4 en un rectángulo y un círculo respectivamente.

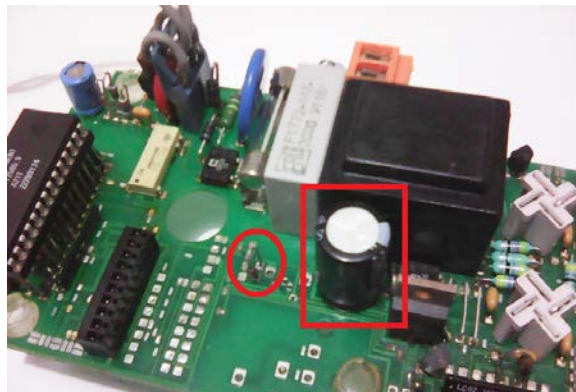


Figura 4 Tarjeta electrónica de la bomba dosificadora.

Características del control de temperatura original

El control de temperatura original de la planta para el hervidor era manual (figura 5), se controlaba desde un potenciómetro y se monitorea en un indicador que trabaja con una Termoresistencia PT100.

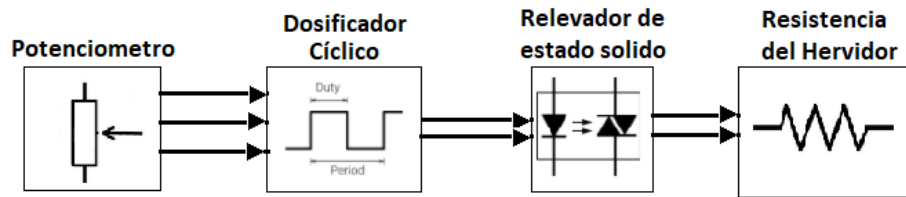


Figura 5 Control de temperatura manual.

Alternativas para la implementación del control de temperatura

Para seleccionar la alternativa más adecuada, se consideró que cualquier implementación que se realice, modifique en menor medida el gabinete de control, además tenía que ser sencilla la manipulación para el operador. Las alternativas que se tuvieron son las siguientes:

- Realizar la instalación de una computadora y por medio de ésta monitorear y controlar la temperatura. Requiere de modificaciones de dispositivos del gabinete de control para el acondicionamiento de señales, tarjeta de adquisición de datos y programación de software para el control y la interface de usuario.
- desarrollar la instalación de un controlador PID para temperatura que cuente con las características eléctricas necesarias.
- efectuar el control por medio de una tarjeta Arduino. Esta alternativa requiere de modificaciones de dispositivos del gabinete de control para el acondicionamiento de señales e implementación de un indicador LCD.

Selección de alternativa

Para la primera alternativa eran necesarios dispositivos de alto costo como lo son la computadora y la tarjeta de adquisición de datos, en el caso de la segunda alternativa el controlador PID de temperatura es un dispositivo de un costo considerable pero su instalación remplazaba un indicador de temperatura y un dosificador cíclico además modificaba físicamente el gabinete de control. Por otro lado, en la tercera alternativa los dispositivos que se requieren son de bajo costo y su instalación modifica el gabinete de control, pero no remplaza ningún dispositivo. Por lo tanto, se concluye que la tercera alternativa es más adecuada.

Problemática

El sistema de control que se quiso implementar requiere del uso de la PT100 para cerrar el lazo de control (figura 6), el problema que se presento fue que el indicador de temperatura trabaja única y exclusivamente con la PT100 y esta no puede ser utilizada en dos circuitos simultáneamente.

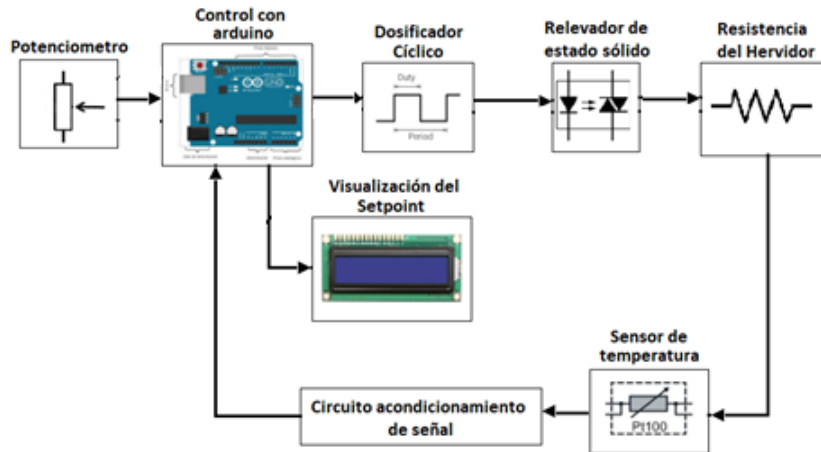


Figura 6 Diagrama del sistema de control automático idealizado.

Solución

En la tarjeta electrónica del indicador de temperatura se identificó un voltaje proporcional a la temperatura mostrada en su display.

A esa señal de voltaje se le hizo acondicionamiento de señal y para realizar pruebas externamente, se conectaron cables, (figura 7) y se utilizó la fuente de la tarjeta.

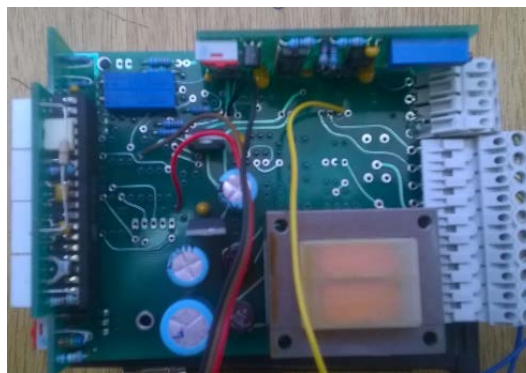


Figura 7 Identificación de voltaje proporcional a la temperatura (cable amarillo).

Acondicionamiento de señal

Se implementó un circuito electrónico que genera un voltaje de 0 a 5 Vcd proporcional a la temperatura del indicador con un rango de 0 a 200 °C (figura 8).

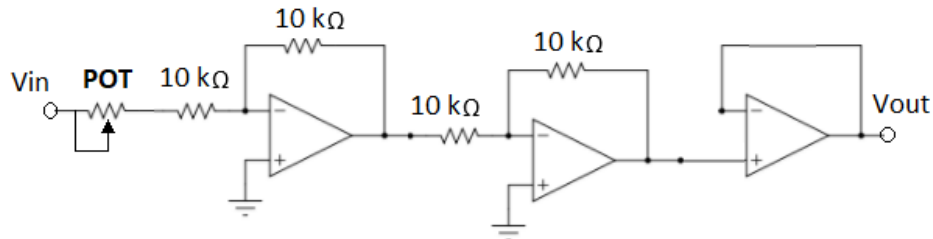


Figura 8 Acondicionamiento de señal.

Montaje del circuito

Se diseñó e implemento la tarjeta electrónica del acondicionamiento de señal y se montó en la tarjeta del indicador (figura 9), fue conectado un sócalo de ocho pines para su conexión. Posteriormente se calibro y se midió el voltaje de salida para diferentes temperaturas.

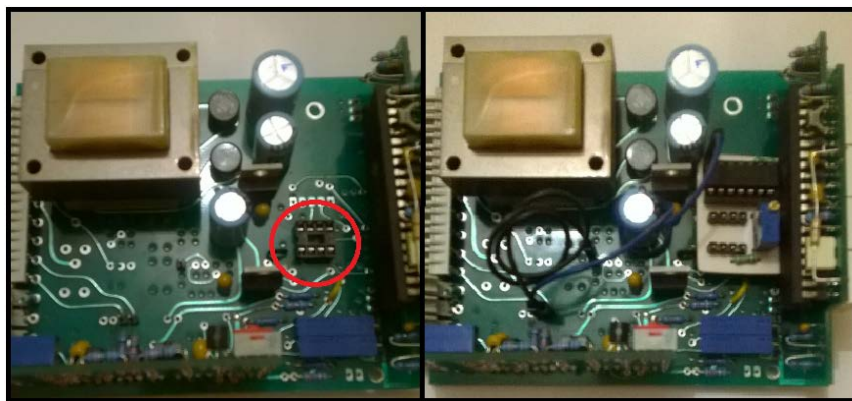


Figura 9 Montaje de la tarjeta de acondicionamiento de señal.

Circuito de control

Se realizó una fuente de voltaje de 9 Vcd para la alimentación del Arduino, para el Setpoint se utilizó un potenciómetro del gabinete de control, y para la comunicación con la LCD se usaron las salidas digitales 2 a la 8, la salida de control PWM fue amplificada a 9 Vcd (figura 10). Al dosificador cíclico se le

conecto la señal de control que fue amplificada, para controlar su salida en un rango de 0 a 90 % de su ciclo de trabajo.

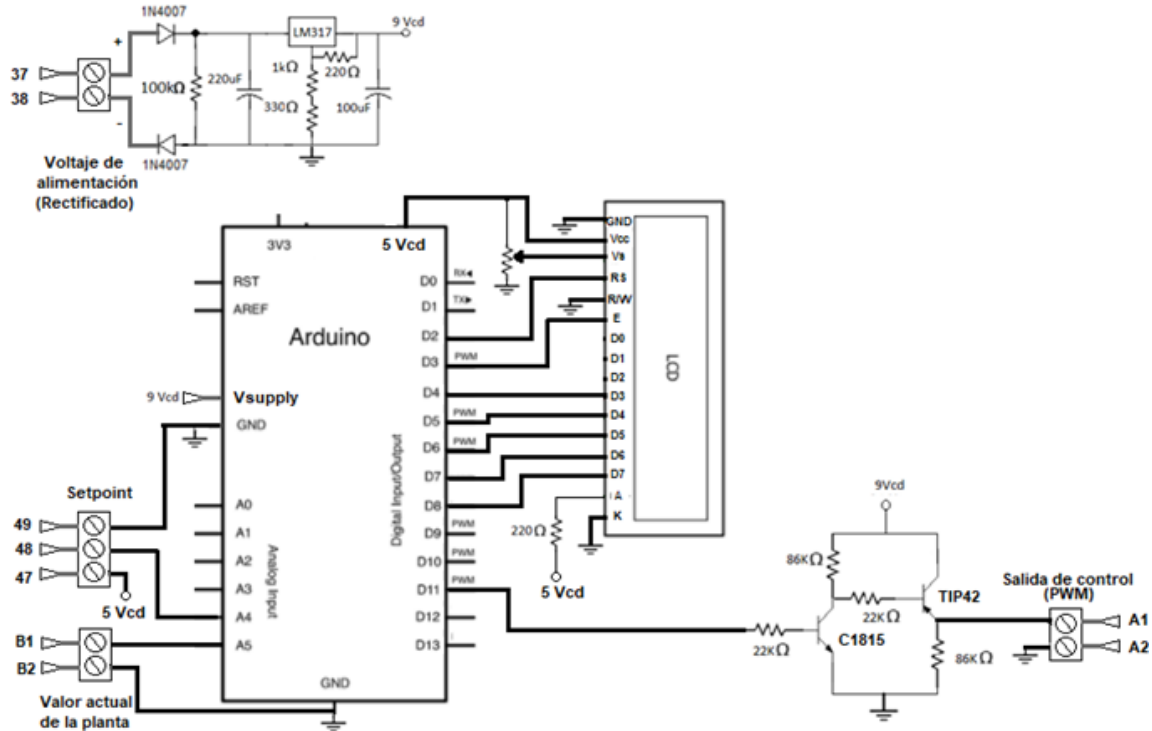


Figura 10 Circuito de la tarjeta de control.

Tarjeta de control

Se diseñó e implemento la tarjeta de control (figura 11) en la cara frontal el circuito de la fuente de 9 Vcd, el circuito amplificador de la salida de control y la tarjeta Arduino. En el lado posterior la tarjeta LCD.

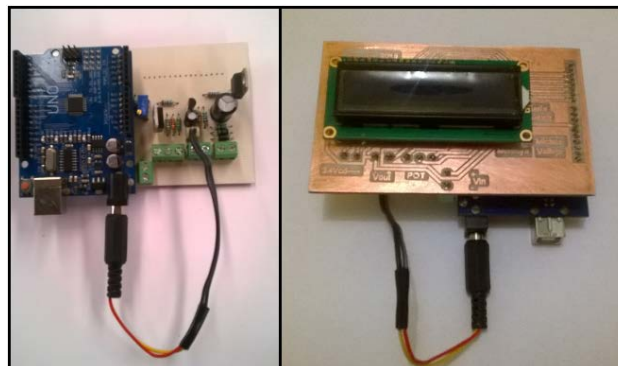


Figura 11 Tarjeta de control, vista frontal (Izq.), vista posterior (Der.).

Medición del dosificador cíclico

Se utilizó un osciloscopio para la medición de la entrada y salida del dosificador cíclico. En la figura 12 en color azul la entrada (salida de tarjeta Arduino) y en amarillo la salida.

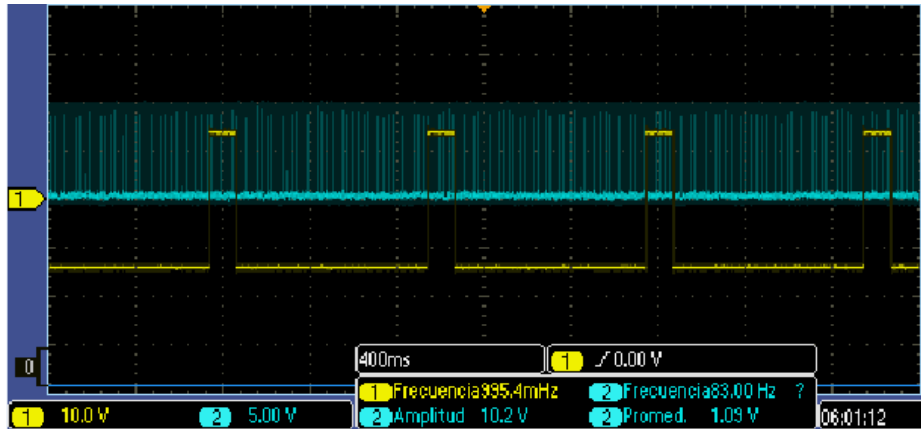


Figura 12 Entrada (Azul) y salida (Amarillo) del dosificador cíclico.

Instalación de tarjeta de control

Para la instalación se hizo una ranura de 7.2x2.5 cm en el gabinete de control, abajo del temporizador de trasiego para montar la LCD. Esta se fijó con tornillos de 1/8" y 1/2" de largo y por último se le pinto un marco color negro. En el interior se realizaron las conexiones necesarias (figura 13).



Figura 13 Instalación de tarjeta de control.

Programa

El diagrama mostrado en la figura 14 indica la secuencia del programa cargado en la tarjeta Arduino, el cual contiene la programación para la LCD y el control de temperatura.

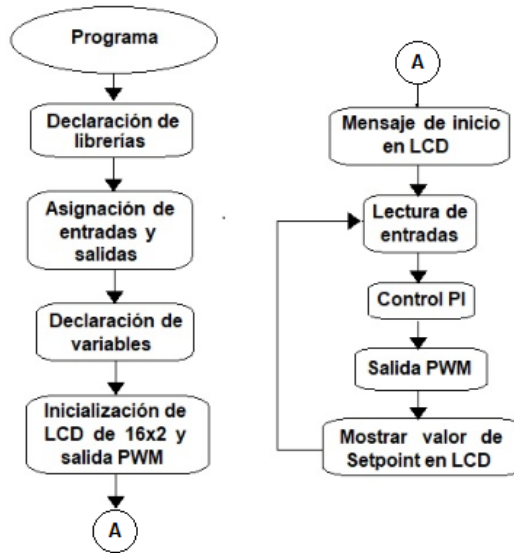


Figura 14 Programa de la tarjeta Arduino.

Sintonización

Se sometió a una entrada escalón la temperatura del hervidor para conocer la dinámica que tiene el sistema (figura 15), pero su comportamiento no es de un típico sistema de primer orden, por ello no se aplicó algún método de sintonización para estos sistemas.

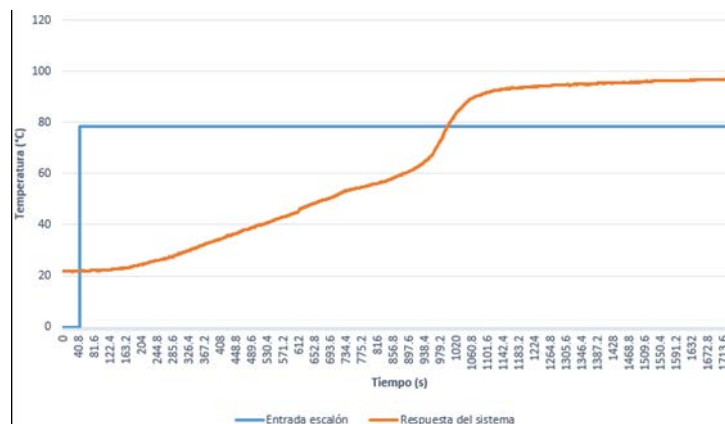


Figura 15 Respuesta del sistema ante una entrada escalón.

La sintonización se realizó de forma manual con el apoyo de la visualización del error y la salida de control en la LCD en la parte inferior derecha e izquierda respectivamente (figura 16). Fue sintonizado para una mezcla de 20 % etanol y 80 % agua destilada.



Figura 16 Visualización del error y salida de control.

3. Resultados

Los resultados del acondicionamiento de señal (tabla 1) presentaron una proporcionalidad exacta.

Tabla 1 Medición de voltajes de salida del acondicionamiento de señal.

Temperatura (°C)	Cálculo (Vcd)	Medición (Vcd)
19	0.475	0.47
21.9	0.5475	0.547
40	1	1
76.5	1.9125	1.91
120	3	3
160.4	4.01	4.02
164.1	4.1025	4.1
183	4.575	4.57
188.5	4.7125	4.71
197.2	4.93	4.93

En la tabla 2 se ilustran los resultados de las mediciones de entrada y salida del dosificador cíclico. Se controló la salida de 0 a 90% del ciclo de trabajo con un voltaje promedio de 0 a 8.9 Vcd.

Tabla 2 Medición de la entrada y salida del dosificador cíclico.

Entrada	salida
Medición de voltaje promedio (Vcd)	Ciclo de trabajo (%)
0.291	0
1.09	10
2.04	20
2.95	30
3.76	40
4.58	50
5.51	60
7.14	70
8.01	80
8.9	90

Para la adquisición de datos de la señal de Setpoint y el valor real de la planta en las pruebas realizadas se utilizó un digitalizador/osciloscopio PCI-5122 que está montado en el CPU NI PXI-1042Q ambos de Nacional Instruments (figura 17). La característica del controlador que se debe cumplir es controlar la temperatura con un error de ± 2 °C.



Figura 17 Equipo para la adquisición de datos.

Primeramente se realizó la sintonización con un controlador proporcional, el mejor resultado fue con una constante $p = 500$ (figura 18), pero en todas las pruebas se presentó error positivo.

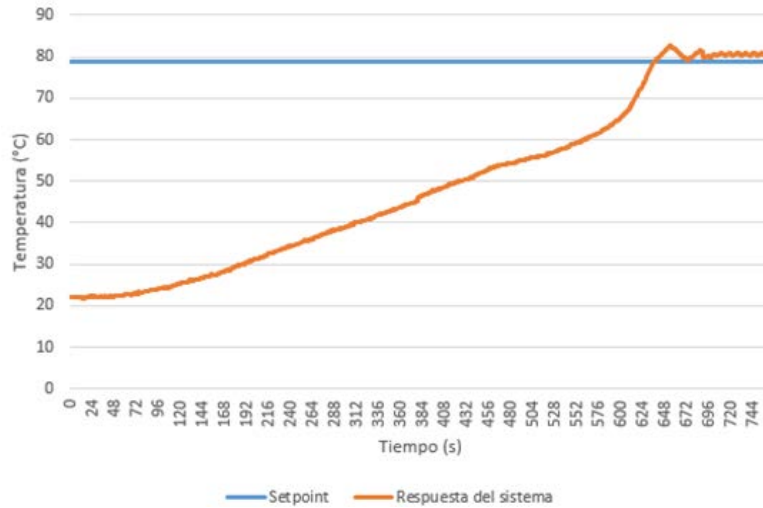


Figura 18 Sintonización del controlador Proporcional ($p = 500$).

Posteriormente se realizó la sintonización para un controlador Proporcional-integral, para eliminar el error con la acción integral. El mejor resultado se obtuvo con unas constantes de $p = 666$ e $i = 0.2365$ (figura 19). Se eliminó el error remanente.

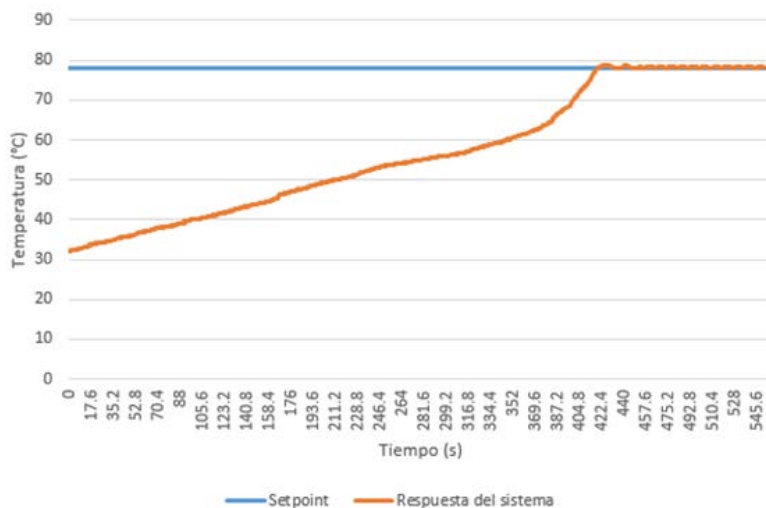


Figura 19 Sintonización del controlador Proporcional-integral ($p = 666, i = 0.2365$).

Se realizaron modificaciones en las conexiones eléctricas del gabinete de la planta al instalar la tarjeta de control, aquí se incluyen los nuevos diagramas eléctricos, dosificadores cíclicos (figura 20).

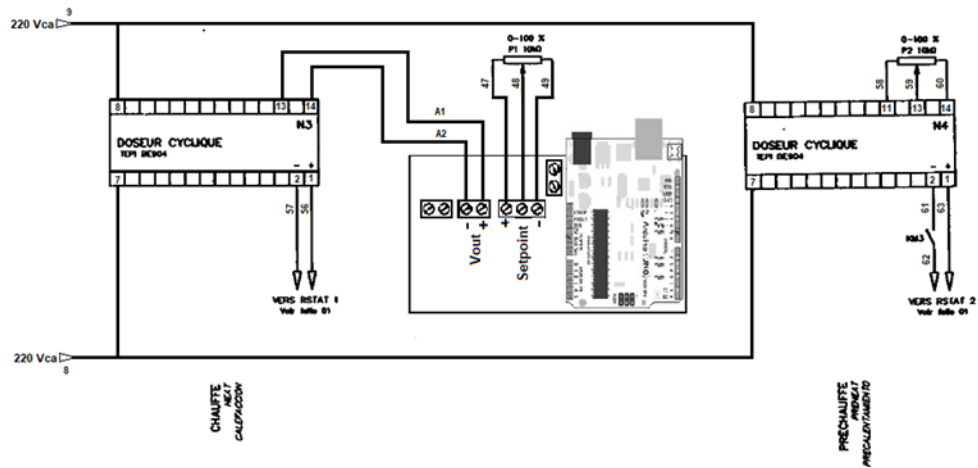


Figura 20 Diagrama eléctrico de dosificadores cíclicos y tarjeta de control.

En la figura 21 se muestra el diagrama eléctrico de los indicadores de temperatura incluyendo los cambios realizados, además incluye un pequeño diagrama de la conexión del FAGOR FB1004 ya que en los diagramas existentes no existe un diagrama de su conexión.

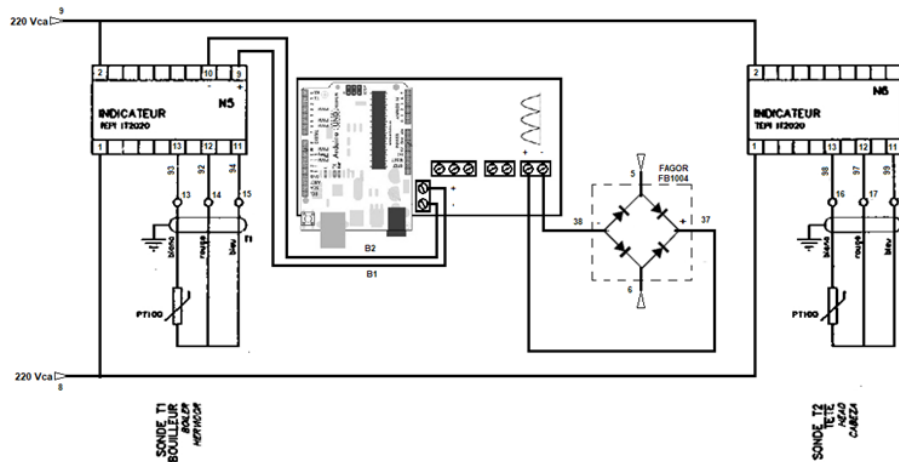


Figura 21 Diagrama eléctrico de los indicadores de temperatura.

4. Discusión

Se consiguió poner en marcha la columna de destilación y controlar de forma automática la temperatura del hervidor. Se recomienda que las prácticas de laboratorio se realicen con concentraciones de 20 % etanol y 80 % agua ya que la sintonización se realizó para esa concentración de la mezcla, de lo contrario la

eficiencia del controlador puede presentar variaciones, esto se atribuye a que la concentración de la mezcla está íntimamente ligada al punto de ebullición (Espinal & Jiménez, 2009). Como trabajo futuro se contempla el control de temperatura del collar calefactor ya que este se controla manualmente.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Vargas, J. I. (2016). Propuesta de Automatización para una columna de destilación por Rectificación continua. instituto politécnico nacional, 1-2.
- [2] Espinal, V., & Jiménez, R. (2009). Diseño, construcción y validación de un equipo de destilación de alcohol etílico. Universidad de el salvador Facultad de ingeniería y arquitectura, 22-30.
- [3] Adriano, S., & Valle, V. (2012). Diseño y construcción de una torre de destilación con rectificación para la purificación del Thinner usado procedente de las mecánicas automotrices. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 22-26.
- [4] Caisa, L., & Sandoval, M. (2009). modelo de simulación de una columna de destilación binaria basado en métodos numéricos. Colegio Politécnico de la universidad San Francisco de Quinto Cumbayá, 2.
- [5] Cuji, F. (2014). Diseño e implementación de un módulo didáctico para el monitoreo y control automático de un sistema de temperatura de un horno. Universidad de las Fuerzas Armadas, 9-13.
- [6] Núñez. A. (2011). Control de un tanque de presión mediante el modulo PID de un autómata programable. Universidad Carlos iii de Madrid Escuela Politécnica Superior, departamento de ingeniería de sistemas y automática, 77-81.
- [7] Ruiz, J. (2007). Manual de programación Arduino. Arduino Notebook, 6-22.
- [8] Estupiñán, G., & Lisca, E. (2010). Sistema de monitoreo telemétrico de los parámetros de operación de un vehículo tele operado. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 3.