

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE NIVEL EN EL FONDO DE
LA PRIMERA COLUMNA DE LA TORRE DE DESTILACIÓN CONTINUA BINARIA
EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN PROCESOS DE INGENIERÍA (C.I.P.I.)

MÓNICA MARÍA FITATÁ BOJACÁ

UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
BOGOTÁ
2018

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE NIVEL EN EL FONDO DE LA PRIMERA COLUMNA DE LA TORRE DE DESTILACIÓN CONTINUA BINARIA EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN PROCESOS DE INGENIERÍA (C.I.P.I.)

MÓNICA MARÍA FITATÁ BOJACÁ

Trabajo de grado para optar al título de Magister

Director
Olmer García Bedoya
PhD. en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
BOGOTÁ
2018

Nota de aceptación

Yo, OLMER GARCÍA BEDOYA en calidad de
director del Trabajo de Grado, certifico que he leído el presente
documento y considero que este reúne los requisitos para optar el
título de Magister por parte de la estudiante
MÓNICA MARÍA FITATÁ BOJACÁ

Bogotá, D.C. 27 de Noviembre de 2018

DEDICATORIA

Quiero dedicar este Trabajo de Grado, principalmente a mis padres, por su apoyo incondicional.

A todos mis compañeros, amigos y cada uno de los profesores que con su experiencia y conocimientos contribuyeron en el mismo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al profesor Olmer García Bedoya director del proyecto de grado, por sus aportes y en especial por la comprensión, trabajar y estudiar era un limitante en tiempo para el avance de la tesis.

A Carlos Arturo Céspedes Zambrano encargado de laboratorio del C.I.P.I por su soporte en las corridas realizadas con la torre, Andrés Felipe Ángulo Sánchez auxiliar de laboratorio de robótica por el préstamo de elementos para armar el lazo de control, esta integración de carreras permitió realizar este trabajo, obteniendo la implementación de control de nivel.

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	11
RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	14
OBJETIVOS.....	16
1. IDENTIFICACIÓN DE LA TORRE	17
2. SIMULACIÓN DE LA TORRE DE DESTILACIÓN BINARIA EN ESTADO ESTACIONARIO.....	20
3. BALANCE Y ECUACIONES DE TRANSFERENCIA	22
3.1 SUPOSICIONES Y CONSIDERACIONES	22
3.2 BALANCES	22
3.3 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	26
4. ANÁLISIS DE PERTURBACIONES.....	28
5. ESTRATEGIA CONTROL DE NIVEL	31
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
BIBLIOGRAFÍA.....	38
ANEXOS.....	40

LISTAS ESPECIALES

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados de las prácticas en lazo manual.....	19
Tabla 2. Balance de masa según simulación de la torre de destilación en Aspen Hysys.	21
Tabla 3. Composición de destilado en Aspen Hysys.	21
Tabla 4. Control on-off (montaje 1) vs control on-off con histéresis (montaje 2)....	35
Tabla 5. Resultados de las corrientes bajo simulación.	43
Tabla 6. Características de la válvula solenoide.	45
Tabla 7. Características del sensor.....	46

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Torre de destilación del CIPI.....	17
Figura 2. Esquema de la torre de destilación realizada en AutoCAD.	18
Figura 3. Entorno de la simulación en Aspen Hysys.....	20
Figura 4. Fondos de la primera columna.	22
Figura 5. Diagrama de bloques del sistema de control de nivel retroalimentado...26	26
Figura 6. Diagrama de bloques en Simulink.	28
Figura 7. Nivel (m) vs Tiempo (s) condiciones iniciales con el programa Simulink.....	29
Figura 8. Señal de control sobre el punto de operación con el programa Simulink.....	29
Figura 9. Nivel (m) vs Tiempo (s) alimento de vapor con el programa Simulink. ...	30
Figura 10. Control ON-OFF implementado.	31
Figura 11. Diagrama de control ON-OFF.....	31
Figura 12. Diagrama de bloques en LabVIEW con retraso de tiempo.	32
Figura 13. Toma de datos primer montaje.	32
Figura 14. Montaje de control con histéresis.	33
Figura 15. Diagrama por histeresis.	33
Figura 16. Panel frontal en Lab View.	33
Figura 17. Diagrama de bloques control ON-OFF en LabVIEW.	34
Figura 18. Toma de datos montaje dos.	34
Figura 19. Internos de la torre.....	41
Figura 20. Desmonte de los platos.	41
Figura 21. Toma de medidas.	41
Figura 22. PFD de la torre de destilación del CIPI.	42
Figura 23. P&ID de la torre de destilación del CIPI.....	44
Figura 24. Montaje del conexionado eléctrico del sistema de control.	47
Figura 25. Esquema de conexionado eléctrico del sistema de control.	47

LISTA DE ECUACIONES

Pág.

Ecuación 1. Balance de masa total.....	23
Ecuación 2. Balance por componente	23
Ecuación 3. Balance de energía	23
Ecuación 4. Eliminación de la variable V_f	23
Ecuación 5. Capacidad de la válvula	24
Ecuación 6. Caída de presión.	24
Ecuación 7. Ecuación no linealizada.....	24
Ecuación 8. Expansión series Taylor	25
Ecuación 9. Ecuación linealizada.....	25
Ecuación 10. Transformadas de Laplace de primer orden	26
Ecuación 11. Funciones de transferencia.	26
Ecuación 12. Función de transferencia fondos.	26
Ecuación 13. Función de transferencia del sensor.	27
Ecuación 14. Funciones de transferencia de perturbaciones.	27

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Reconocimiento de la torre	41
ANEXO B. PFD Y P&ID del proceso.....	42
ANEXO C. Instrumentación	45
ANEXO D. Montaje y conexionado	47

GLOSARIO

Adquisición de datos: Es el proceso de medir con un computador un fenómeno eléctrico o físico. Para este caso el sistema de adquisición de datos consiste de dos sensores, una válvula solenoide, una tarjeta de adquisición de datos y un computador con software programable (LabVIEW).

Función de transferencia: Expresión matemática de la relación dinámica entre las señales de entrada y salida de un sistema.

Punto de consigna: Se le conoce como el valor deseado, o de referencia, de la variable controlada.

RS flip flop: Es una subrutina capaz de permanecer en uno de dos estados posibles durante un tiempo indefinido.

Tarjeta de adquisición de datos: También se conoce como hardware y actúa como la interfaz entre el computador y la instrumentación. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que un computador pueda interpretarlas.

Sensor: Convierte una variable física (en este caso nivel), en una señal compatible con el sistema de medida como lo es el voltaje.

Variable controlada: La variable regulada por el lazo de control que se desea mantener en un valor de referencia o punto de consigna.

Variable manipulada: Señal generada por el controlador para mantener la variable controlada en su punto de consigna.

Variable de perturbación: Variable que no puede ser manipulada, pero afecta al comportamiento de la variable controlada.

Waveform chart: Es un indicador numérico en LabVIEW, que muestra una o más gráficas, reteniendo en pantalla un cierto número de datos.

RESUMEN

El laboratorio del C.I.P.I de la universidad cuenta con una torre de destilación continua donde los estudiantes llevan a cabo las prácticas de transferencia de masa y calor. Para su identificación se llevó a cabo la inspección de la torre, componentes internos y externos de cada columna de destilación; en la puesta en marcha de la torre se obtuvieron datos de operación, con la información recolectada se define un modelo a través del balance de masa y energía. Adicionalmente, la torre se simuló con el software Aspen Hysys para obtener el estado estacionario del sistema. Sobre la planta se implementó un lazo de control para mantener el nivel en 0.18 metros en el fondo de la primera columna, sobre el cual fue hecho un análisis de robustez a partir del modelo linealizado en el punto de operación. Las estrategias de control implementadas, con el software LabVIEW, fueron ON-OFF y ON-OFF con histéresis por limitaciones en la instrumentación requerida. Como resultado se obtuvo que la estabilización de la torre pasó de tres horas a una hora con respecto al control de nivel manual realizado y se observó una mejor regulación en las temperaturas de la cima, primera columna 96 °C y la segunda columna 72°C.

Palabras clave: Columna de destilación binaria, Industria química, Estrategia de control, Control de procesos.

ABSTRACT

The laboratory of C.I.P.I of the university has a continuous distillation tower where students carry out mass and heat transfer practices. For its identification, the inspection of the tower was carried out to identify the internal and external components of each distillation column. These tests allowed obtaining data from the point of operation during the start-up of the tower. With this information collected, a model was defined through the mass and energy balance. Additionally, the tower was simulated under the Aspen Hysys software to obtain the steady state of the system. A control system was carried out on the plant to maintain the level in 0.18 meters in the bottom of the first column, on which a robustness analysis was made from the linearized model at the point of operation. The control strategies implemented, with LabVIEW software, were ON-OFF and ON-OFF with hysteresis due to limitations in the instrumentation. As a result, it was found that the time stabilization of the tower decreased from three hours to one hour to concerning the manual level control and, a better regulation was observed in the temperatures of the top of first column 96°C and second column 72°C.

Keywords: Binary distillation column, Chemical industry, Control strategy, Process control.

INTRODUCCIÓN

La destilación es una de las operaciones unitarias más importantes en la industria química consiste en separar corrientes con dos o más componentes (Luyben, 2014). La Universidad cuenta con una torre de destilación ubicada en el Centro de Investigación en Procesos de Ingeniería (C.I.P.I); la cual, presenta tiempos de estabilización de hasta tres horas, lo que reduce la experiencia operativa de los estudiantes. A su vez, genera una inadecuada práctica en el laboratorio e inseguridad en la operación del equipo puesto que, se inunda en el fondo (Cardenas Tovar & Rodríguez Rivera, 2016).

En la Universidad Nacional se toma de referencia una tesis de maestría sobre el modelado y control de una columna de destilación binaria para la separación de la mezcla de etanol y agua (Alzate Ibañez, 2010). Su contribución se debe al modelo dinámico, y las suposiciones y consideraciones adoptadas, con las ecuaciones diferenciales no lineales de cada uno de los modelos se resuelven utilizando Runge Kutta de cuarto orden. El comportamiento de cada uno de ellos se analiza antes de las variaciones en los parámetros para determinar el modelo más apropiado para el desarrollo del algoritmo de control (Alzate Ibañez, 2010). La tesis presenta el análisis dinámico del sistema de la columna de destilación binaria mediante la linealización en torno a un punto de equilibrio y el estudio de las bifurcaciones variando los parámetros del sistema de forma independiente (Alzate Ibañez, 2010).

Otro referente es una tesis de diseño y construcción de una interfaz de control de nivel, temperatura y flujo de agua en un tanque para uso en prácticas de laboratorio. La contribución es diseñar y construir la interfaz de control físico, modelar el sistema, elaborar un programa de computadora para la adquisición de datos y controlar, se utilizó el programa Simulink para la simulación numérica (Richmond Salazar, 2009).

La emulación de una columna de destilación binaria continua para propósitos de entrenamiento en control con propósitos educativos permite la experimentación sin tener el sistema real. Este artículo trabajó la emulación, la respuesta de la composición del producto bajo perturbaciones en la alimentación se obtiene utilizando Matlab y Simulink (Franco Ocampo & Franco Mejía, 2015).

Por esta razón, este trabajo surge bajo la premisa de dar continuidad al proceso previamente realizado en la torre de destilación donde se incluyó el lazo de control

de temperatura de la cima de la segunda columna de la torre de destilación continua con ayuda de programas de simulación, Aspen Hysys y LabVIEW, donde se logró una reducción apreciable en el tiempo de estabilización del equipo de cinco a tres horas (Cardenas Tovar & Rodríguez Rivera, 2016).

Finalmente, este trabajo consistió en diseñar e implementar un lazo de control de nivel del fondo de la torre con el propósito de estabilizar la torre en un menor tiempo, manteniendo la variable controlada en un nivel de 0.18 m, previniendo que no se inunde la torre de destilación por excesiva entrada de líquido o por el contrario si el flujo de líquido es muy bajo se pueda desocupar la torre. En primer lugar, se realizó la identificación de los parámetros de la torre, siguiendo la simulación del sistema en Aspen Hysys para obtener el estado estable del sistema. El modelo matemático del sistema se presenta para analizar las perturbaciones del controlador implementado con Simulink, la adquisición de datos consta de sensores, electroválvula, tarjeta de adquisición de datos y una PC con software programable en LabVIEW.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un control de nivel en el fondo de la primera columna de destilación continua binaria en el centro de investigación en procesos de ingeniería (C.I.P.I.)

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar la operación y el comportamiento de las variables de la columna de destilación.
2. Desarrollar el modelo que representa la columna y la simulación en Aspen Hysys.
3. Definir la estrategia de control de nivel para el monitoreo de la columna con el software LabView.

1. IDENTIFICACIÓN DE LA TORRE

La operación de la planta inicia con la corriente de alimentación de una mezcla etanol-agua, esta pasa por una bomba, y antes de entrar al proceso directamente pasa por un intercambiador para precalentarse, modificando así la temperatura a 55°C, para precalentar la mezcla se usa como fluido de servicio la energía térmica del fondo de la primera columna de destilación.

La torre cuenta con un tablero de control con las señales de los indicadores de temperatura a través de termopares que permiten que el operador pueda leer la temperatura en cada tramo de la torre. En el mismo tablero se encuentran los botones de potencia de encendido de las bombas. También cuenta con indicadores de presión tipo bourdón que permiten medir y verificar que la caldera suministre la presión del vapor a la torre. Debido a que contempla regulación con un juego de válvulas manuales tipo bola, genera mayores exigencias en mano de obra de los estudiantes. De esta manera, su operación se debe realizar con un mínimo de tres personas.

Como se muestra en la Figura 1, se observa que la torre de destilación consta de dos columnas:

Figura 1. Torre de destilación del CIPI.



Fuente: Propia

La columna 1 es de destilación (columna de la izquierda), conformada por tres secciones de platos cada una con cuatro platos por sección y dos secciones de empaques en la parte alta de la torre (Ver Anexo A), cuenta con seis sensores de temperatura. En la Figura 2 se muestran las corrientes de entrada que son la alimentación (A) que se da en el plato 13, y la inyección de vapor que entra en contacto directo a través de una flauta en el fondo de la columna.

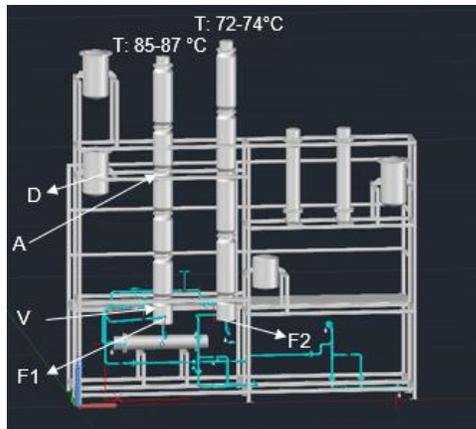
La columna 2 es de Rectificación (Columna de la derecha) cuenta con cuatro secciones de lecho empacado, tiene cinco sensores de temperatura, y un suministro de vapor indirecto que pasa a través de un serpentín en el fondo de la columna.

La torre se puso en operación preparando aproximadamente 200 L de una solución etanol-agua al 15% en volumen. Los 200 L permiten la operación de la columna de forma continua, incluyendo el sistema de reflujo aproximadamente unas seis horas sin implementar ningún sistema de control.

Se llevaron a cabo 3 prácticas (Ver Tabla 1). Para la preparación se usaron 30 L de etanol al 86%. La practica 1 se realizó sin reflujo, la practica 2 con bajo reflujo y alta velocidad de destilado y practica 3 reflujo alto y baja velocidad del destilado, obteniendo mayor recuperación de etanol con alto reflujo a baja velocidad de destilación.

Al momento de su operación manual se evidenció que la torre destila de manera continua cuando la temperatura de la cima de la primera torre se mantiene a los 86 °C y la cima de la segunda torre a los 72-74 °C (ver Figura 2), donde se logra el mejor destilado.

Figura 2. Esquema de la torre de destilación realizada en AutoCAD.



Fuente: Propia

En la Figura 2 se muestra las corrientes de entrada y salida de la torre. Cada corriente se denominó de la siguiente manera:

- A: Alimento de la torre
- D: Destilado de la torre
- V: Vapor proveniente de la caldera
- F: Fondos de la torre

F1: Fondos primera columna
F2: Fondos segunda columna

Tabla 1. Resultados de las prácticas en lazo manual.

Parámetro	Práctica 1	Práctica 2	Práctica 3
Temperatura de la cima de la segunda columna (°C)	74.0	74.0	72.0
Reflujo (No. de vueltas)	0.0	2.0	4.0
Destilado obtenido en práctica (L/h)	4.0	1.8	2.0
Recuperación de Etanol (%)	77.0	84.0	85.0
Tiempo de la practica (h)	5.0	6.0	6.0
Alimento preparado (L)	200.0	200.0	200.0

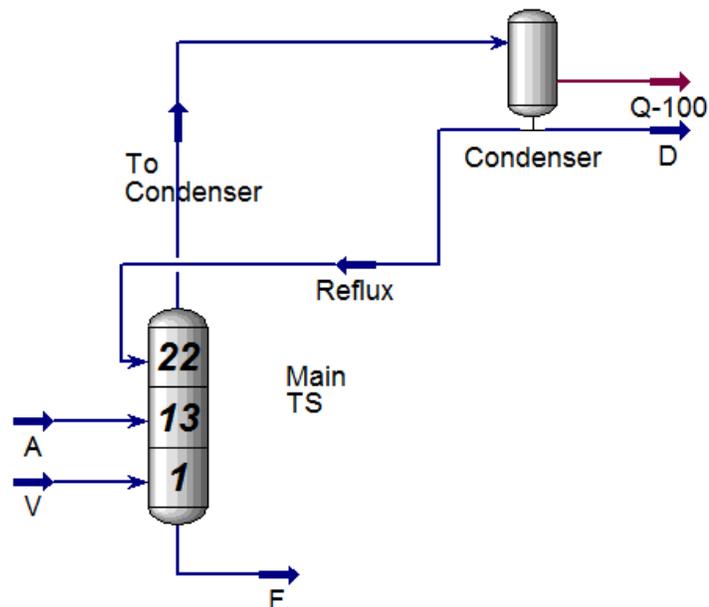
Fuente: Propia

Como resultado de esta etapa se generó un PDF y un P&ID de la torre en el Anexo B del presente documento.

2. SIMULACIÓN DE LA TORRE DE DESTILACIÓN BINARIA EN ESTADO ESTACIONARIO

La torre de destilación se simuló en estado estacionario empleando el software Aspen Hysys y corresponden a las condiciones iniciales para el modelo y simulación en estado dinámico. Para la estimación de propiedades termodinámicas el modelo seleccionado en el software Aspen Hysys fue NRTL (Non-Random-Two-Liquid) que trabaja mezclas binarias no ideales, basadas en la ecuación de energía de Gibbs con dos parámetros binarios o más, que dan resultados confiables, el modelo no es complejo matemáticamente, es de tipo empírico y semiteórico (Poling, Prausnitz, & O'Connell, 2004)

Figura 3. Entorno de la simulación en Aspen Hysys.



Fuente: Propia.

El equipo utilizado en el simulador Aspen Hysys fue la columna de destilación como se muestra en la Figura 3, se simula sin rehervidor y con 22 etapas reales que conforman el equipo (Cardenas Tovar & Rodríguez Rivera, 2016).

En la Tabla 2 se encuentran reportados los resultados obtenidos del balance de masa y en la Tabla 3 se relaciona la composición de destilado. Las letras corresponden a las corrientes de la Figura 2 y Figura 3.

Tabla 2. Balance de masa según simulación de la torre de destilación en Aspen Hysys.

Variable	Reflujo	Condensado	A	D	F	V
Fracción de Vapor	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Temperatura [°C]	76.76	76.77	55.00	76.76	92.32	92.32
Presión [kPa]	73.00	73.00	76.53	73.00	76.53	76.53
Flujo Molar [kgmol/h]	0.87	0.88	0.81	0.03	1.71	0.89
Flujo Másico [kg/h]	37.24	37.37	16.19	0.13	32.23	16.17

Fuente: Propia

Tabla 3. Composición de destilado en Aspen Hysys.

Variable	Reflujo	Condensado	A	D	F	V
Comp Frac Mol (Etanol)	0.87	0.87	0.15	0.87	0.03	0.00
Comp Frac Mol (H ₂ O)	0.13	0.13	0.85	0.13	0.97	1.00

Fuente: Propia

3. BALANCE Y ECUACIONES DE TRANSFERENCIA

3.1 SUPOSICIONES Y CONSIDERACIONES

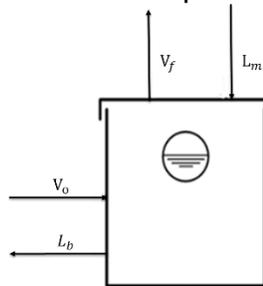
El modelo matemático de la columna de destilación binaria, debe representar el comportamiento dinámico del proceso real, con la finalidad de obtener este modelo se realizaron las siguientes suposiciones y consideraciones:

- En el fondo de la columna la densidad, la presión y la temperatura de las corrientes son constantes.
- La energía está influenciada por la temperatura, el problema se simplifica asumiendo que la entalpía específica del líquido puede ser expresada como un producto de la temperatura y su capacidad calorífica ($H = C_p (T - T_r)$). (Luyben, 2014).
- La temperatura de referencia es $T_r = 298,15 K$
- La entalpía del vapor es constante y se expresa como ($H = C_p T + \lambda$), donde λ es el calor de vaporización. (Luyben, 2014).
- La pérdida de calor se considera despreciable.
- El fondo de la torre es cilíndrico $V=hA_T$, donde h : Nivel en el tanque [m] y A_T : Area total [m²].

3.2 BALANCES

Para realizar el modelo, la Figura 4 representa un diagrama con respecto al balance de materia y al balance energía en los fondos de la columna. Donde las variables son definidas:

Figura 4. Fondos de la primera columna.



Fuente: Propia.

Variable controlada (h): Nivel de los fondos de la primera torre [m]

Variable manipulada (q_{L_b}): Flujo volumétrico de líquido que sale de la última

sección [m³/h]

Variables de perturbación: (q_{V_o}) Flujo volumétrico de vapor proveniente de la caldera [m³/h] y (q_{L_m}) Flujo volumétrico de líquido que ingresa a la sección [m³/h]

Los flujos se pueden calcular a través de un balance de masa total (Ecuación 1), un balance por componente de Agua (Ecuación 2) y un balance por componente de Etanol (Ecuación 2) alrededor de la etapa de contacto se puede escribir de la siguiente manera (Luyben, 2014).

$$V_o + L_m = V_f + L_b \quad (1)$$

$$V_o Z + L_m X_i = V_f Y_i + L_b X_i \quad (2)$$

Donde:

V_o : El flujo másico de vapor proveniente de la caldera [Kg/h]

L_m : El flujo másico de líquido que ingresa a la sección [Kg/h]

V_f : El flujo másico de vapor que sale de la sección [Kg/h]

L_b : El flujo másico del líquido que deja la última sección de la columna por la gravedad [Kg/h]

Z : Composición vapor proveniente de la caldera [Kg agua/Kg total]

X_i : Composición de líquido del componente i que puede ser agua o etanol [Kg del componente /Kg total]

Y_i : Composición de vapor del componente i que puede ser agua o etanol [Kg del componente /Kg total]

El balance de energía contempla las entalpías de la corrientes vapor y liquido se puede expresar como se muestra en la ecuación 3.

$$V_o H_o - V_f H_f + L_m H_m - L_b H_b = \rho A_T C_p T \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

Donde:

H_o : Entalpía másica del vapor proveniente de la caldera. [J/kg]

H_m : Entalpía másica del líquido que ingresa a la sección [J/kg]

H_b : Entalpía másica de vapor que sale de la sección [J/kg].

H_f : Entalpía másica de los fondos de la torre [J/kg]

A través de la ecuación 1 se eliminó V_f de la ecuación 3 y se obtuvo la ecuación 4.

$$V_o H_o - (V_o + L_m - L_b) H_f + L_m H_m - L_b H_b = \rho A_T C_p T \frac{dh}{dt} \quad (4)$$

Al sistema de ecuaciones se introduce el modelo de la válvula ecuación 5. La velocidad de flujo a través de la válvula depende del tamaño, la caída de presión, la posición y propiedades del fluido (Luyben, 2014). El flujo del líquido a través de una válvula está dado por (A Smith & B. Corripio, 2000).

$$q_{Lb} = \alpha C_V(vp) \sqrt{\frac{\Delta P}{G}} \quad (5)$$

Donde:

q_{Lb} : Flujo de líquido que sale de la última sección de la columna por efecto de la gravedad [m^3/h]

α : Coeficiente de conversión a sistema internacional.

C_V : Coeficiente de la válvula [$gpm/psi^{1/2}$]

ΔP : Caída de presión a través de la válvula [kPa]

vp : Apertura de la válvula; si su valor es 0, la válvula está cerrada; si el valor es 1, la válvula está abierta.

G : Gravedad específica del líquido que fluye a través de la válvula, sin dimensiones.

Para este proceso, la caída de presión (ecuación 6) a través de la válvula está dada por (Smith & Corripio, 2000).

$$\Delta P(t) = P_1 + \rho gh - P_2 \quad (6)$$

Donde:

P_1 : Presión sobre el líquido [kPa]

ρ : Densidad del líquido [kg/m^3]

g : Aceleración debida a la gravedad [$9.8 m/s^2$]

P_2 : Presión de salida de la válvula [kPa]

La ecuación 7 se obtiene al reemplazar Lb en la ecuación 4 a través de la ecuación 5 y ecuación 6.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{q_{Vo}\rho_{Vo} (C_{pVo}(T_{Vo} - Tr) + \lambda_v)}{\rho A_T C_p T} + \frac{q_{Lm}\rho_{Lm} C_{pLm}(T_{Lm} - Tr)}{\rho A_T C_p T} - \frac{(q_{vo}\rho_{vo} + q_{Lm}\rho_{Lm} - \left(C_V(vp(t)) \sqrt{\frac{P_1 + \rho gh - P_2}{g}} \right) \rho_{lb}) (Y_{et}(C_{pet}(T_{vf} - Tr) + \lambda_{et}) + Y_{ag}(C_{pag}(T_{vf} - Tr) + \lambda_{ag}))}{\rho A_T C_p T} - \frac{\left(C_V(vp(t)) \sqrt{\frac{P_1 + \rho gh - P_2}{g}} \right) \rho_{Lb} C_{pLb} (T_{Lb} - Tr)}{\rho A_T C_p T} \quad (7)$$

Donde:

C_{pet} : Capacidad calorífica del etanol en estado de vapor como componente puro [$J/kg^\circ C$]

$C_{p_{ag}}$: Capacidad calorífica del agua en estado de vapor como componente puro [J/kg°C]

T_{Vf} : Temperatura del tope de la sección de fondos de la primera columna [°C]

λ_{ag} : Entalpía de evaporización del agua como componente puro a condiciones ambientales de Bogotá [J/kg]

λ_{et} : Entalpía de evaporización del etanol como componente puro a condiciones ambientales de Bogotá [J/kg]

T : Temperatura de la sección [°C]

Para la linealización de la ecuación 7, se utiliza la expansión de series de Taylor ecuación 8, con punto de operación presentado en la Tabla 2.

$$\frac{d\Delta h(t)}{dt} = \left(\frac{\partial f}{\partial V_o}\right)\bigg|_{op} \Delta q_{V_o}(t) + \left(\frac{\partial f}{\partial L_m}\right)\bigg|_{op} \Delta q_{L_m}(t) - \left(\frac{\partial f}{\partial vp}\right)\bigg|_{op} \Delta vp(t) - \left(\frac{\partial f}{\partial h}\right)\bigg|_{op} \Delta h(t) \quad (8)$$

Se definen las variables de desviación:

$$Q_{V_o}(t) = q_{V_o}(t) - q_{V_o}^s, Q_{L_m}(t) = q_{L_m}(t) - q_{L_m}^s, \\ VP(t) = vp(t) - vp^s, \bar{h}(t) = h(t) - h^s$$

Se sustituyen las variables de desviación en la ecuación 9 linealizada

$$\frac{d\bar{h}(t)}{dt} = \alpha_1 Q_{V_o} + \alpha_2 Q_{L_m} - \alpha_3 \bar{h} - \alpha_4 \bar{h} - C_1 VP \quad (9)$$

Donde los valores de las constantes son

$C_1 = C_V \sqrt{\frac{P_1 + \rho gh - P_2}{G}}$	$C_2 = C_V \rho g vp^2 \left(\sqrt{\frac{P_1 + \rho gh - P_2}{G}} \right)^{-\frac{1}{2}}$
$\alpha_1 = \frac{\rho_{V_o}(C_{p_{V_o}}(T_{V_o} - Tr) + \lambda_{V_o})}{\rho_{A_T} C_p T}$	$\alpha_2 = \frac{\rho_{L_m} C_{p_{L_m}}(T_{L_m} - Tr)}{\rho_{A_T} C_p T}$
$\alpha_3 = \frac{(q_{V_o} \rho_{V_o} + q_{L_m} \rho_{L_m} - C_2 \rho_{L_b})(Y_{et}(C_{p_{et}}(T_{V_f} - Tr) + \lambda_{et}) + Y_{ag}(C_{p_{ag}}(T_{V_f} - Tr) + \lambda_{ag}))}{\rho_{A_T} C_p T}$	
$\alpha_4 = \frac{C_2 \rho_{L_b} C_{p_{L_b}}(T_{L_b} - Tr)}{\rho_{A_T} C_p T}$	

3.3 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Lo anterior, permite obtener las funciones de transferencia como se muestra en la ecuación 11, a través de la transformada de Laplace de primer orden ecuación 10, para el análisis de la dinámica de procesos y el diseño de sistemas de control (A Smith & B. Corripio, 2000).

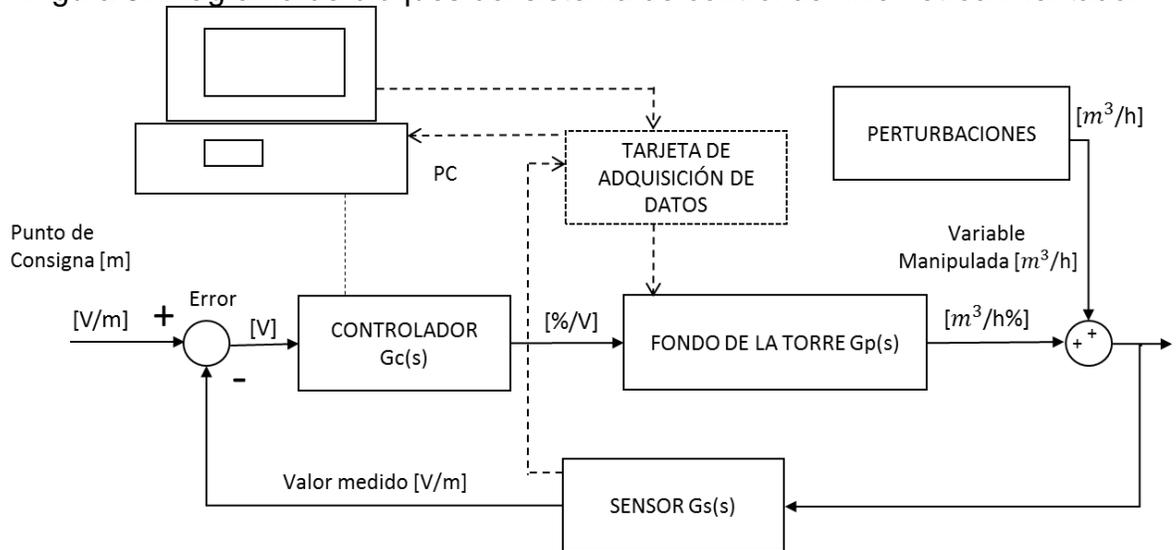
$$\bar{h}(S) = \frac{K_1}{\tau s + 1} Q_{Vo} + \frac{K_2}{\tau s + 1} Q_{Lm} + \frac{K_3}{\tau s + 1} VP \quad (10)$$

Donde,

$$\tau = \frac{1}{\alpha_3 + \alpha_4}, K_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_3 + \alpha_4}, K_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_3 + \alpha_4}, K_3 = \frac{C_1}{\alpha_3 + \alpha_4} \quad (11)$$

Las funciones de transferencia se representaron en un diagrama de bloques para el sistema de control como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Diagrama de bloques del sistema de control de nivel retroalimentado.



Fuente: Propia

Donde la función de transferencia ecuación 12 (G_p) involucra la función de transferencia del fondo de la columna de destilación y de la válvula solenoide.

$$G_p = \frac{K_3}{\tau s + 1} = \frac{2,86}{1,61s + 1} \quad (12)$$

La función de transferencia del sensor ecuación 13 (G_s) define la ganancia como el cambio en la salida o variable de respuesta entre el cambio en la entrada o

función de forzamiento (A Smith & B. Corripio, 2000), la salida es una señal electrónica de 0 a 24 Voltios y la entrada es el nivel del líquido de 0 a 0,18 m.

$$G_s = \frac{\text{Voltaje salida}}{\text{Nivel del liquido}} = \frac{24 - 0}{0,18 - 0} \quad (13)$$

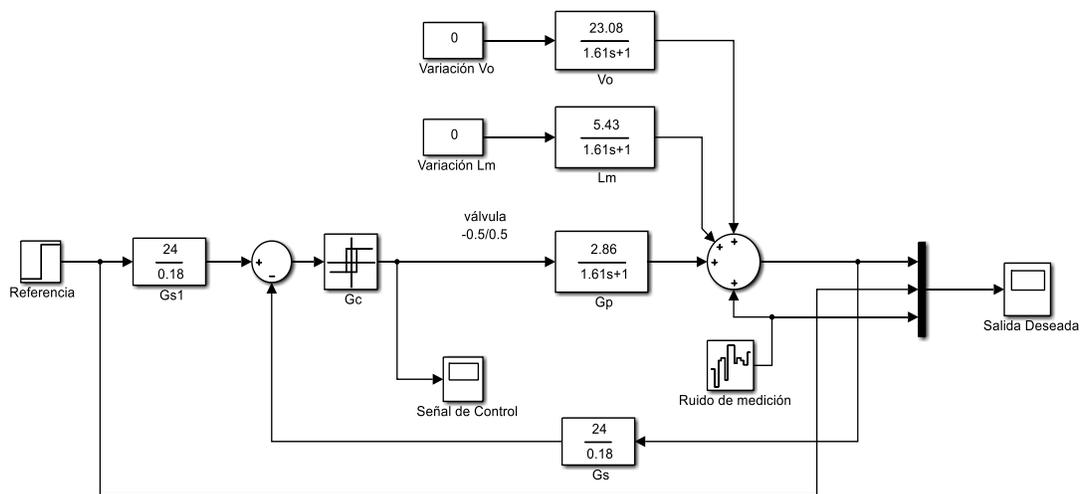
En la Figura 5 también se identifica las funciones de transferencia de las perturbaciones para el lazo de control de nivel en los fondos, la cual para este sistema son las presentadas en la ecuación 14.

$$\frac{X(S)}{Q_{Vo}(s)} = \frac{23,08}{1,61s+1}, \quad \frac{X(S)}{Q_{Lm}(s)} = \frac{5,43}{1,61s+1} \quad (14)$$

4. ANÁLISIS DE PERTURBACIONES

Para analizar la robustez y la estabilidad del sistema de control, realizamos simulaciones del comportamiento del sistema en diferentes escenarios con el programa Simulink. Para hacer eso, el controlador (G_c) se modeló con un bloque de relés, como se muestra en la Figura 6, creando un controlador por histéresis que permite la salida cambie entre dos valores especificados como fue implementado (ver sección siguiente).

Figura 6. Diagrama de bloques en Simulink.

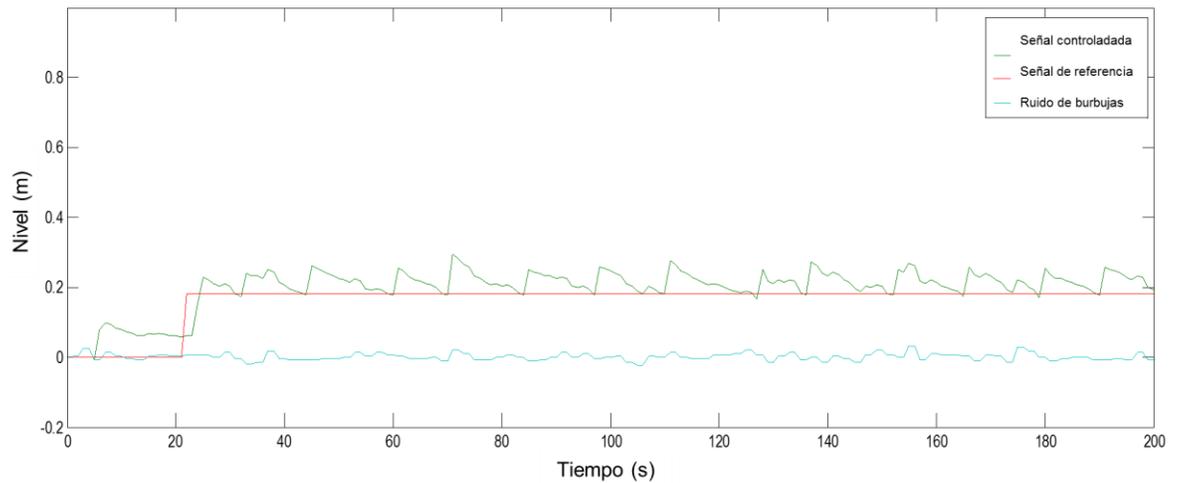


Fuente: Propia

El primer escenario fue lograr que el error estacionario fuera cero en las condiciones de operación. Donde la diferencia de las medidas del punto de referencia y la salida deseada se le conoce como el error, el cual es convertido en un valor y acondicionado para ser utilizado en la apertura o cierre del elemento final de control (Lázaro Castillo, 2008).

Para que la simulación se aproximara a la realidad se incluyó un ruido de medición; el cual es causado por las burbujas que se forman debido al cambio de fase, modelado con un ruido blanco como se muestra en la Figura 7. En su estado estacionario se mantiene alrededor del nivel deseado de 0.18 metros con un ruido de 0.02 metros por arriba y por debajo del punto deseado como se muestra en la Figura 7.

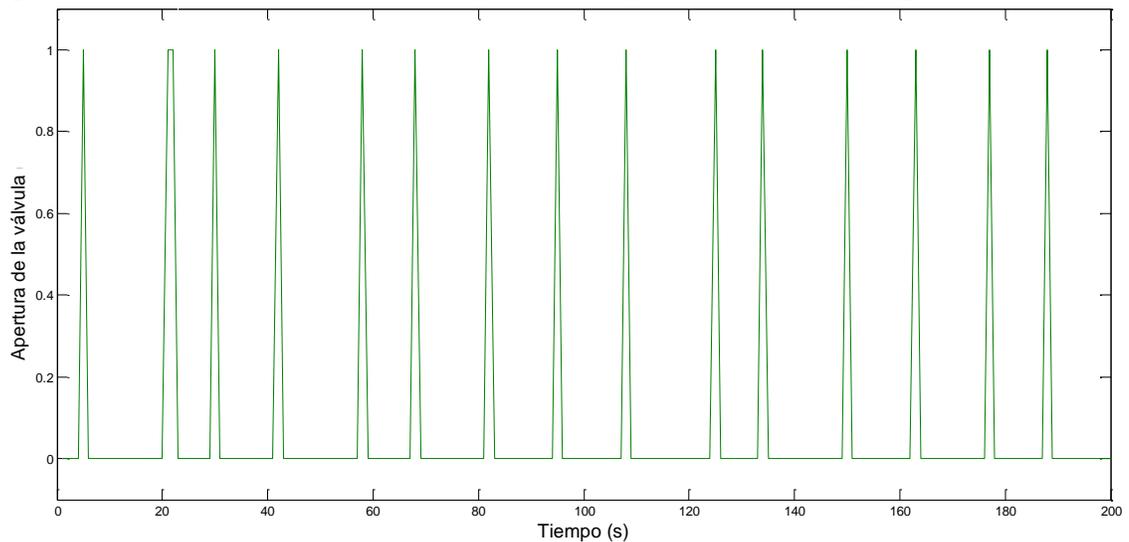
Figura 7. Nivel (m) vs Tiempo (s) condiciones iniciales con el programa Simulink.



Fuente: Propia.

La Figura 8 muestra la señal de control, en la que se puede ver que, aunque hay ruido en la señal de lectura, la frecuencia de encendido y apagado de la válvula no es muy alta con un porcentaje del 54%.

Figura 8. Señal de control sobre el punto de operación con el programa Simulink.

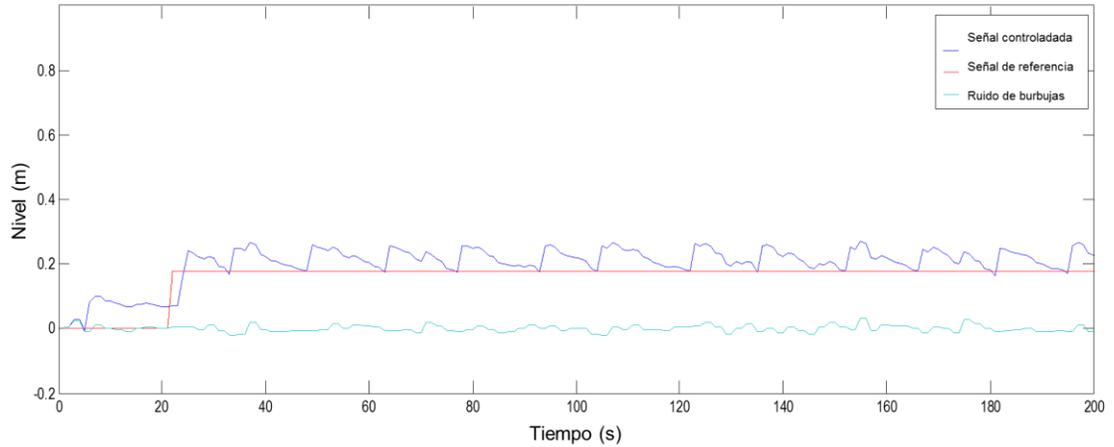


Fuente: Propia.

El segundo escenario analizado fue el cambio del punto de equilibrio de las variables consideradas como perturbación. Para este caso, el vapor que sale de la

caldera tiene influencia en el sistema para generar la formación de burbujas y el aumento de la temperatura en la parte superior de la columna. Como se muestra en la Figura 9, el punto de ajuste se mueve y no mantiene el nivel deseado de 0.18 metros. Por otro lado, se encontró que el controlador es robusto antes de los cambios de ± 0.001 .

Figura 9. Nivel (m) vs Tiempo (s) alimento de vapor con el programa Simulink.



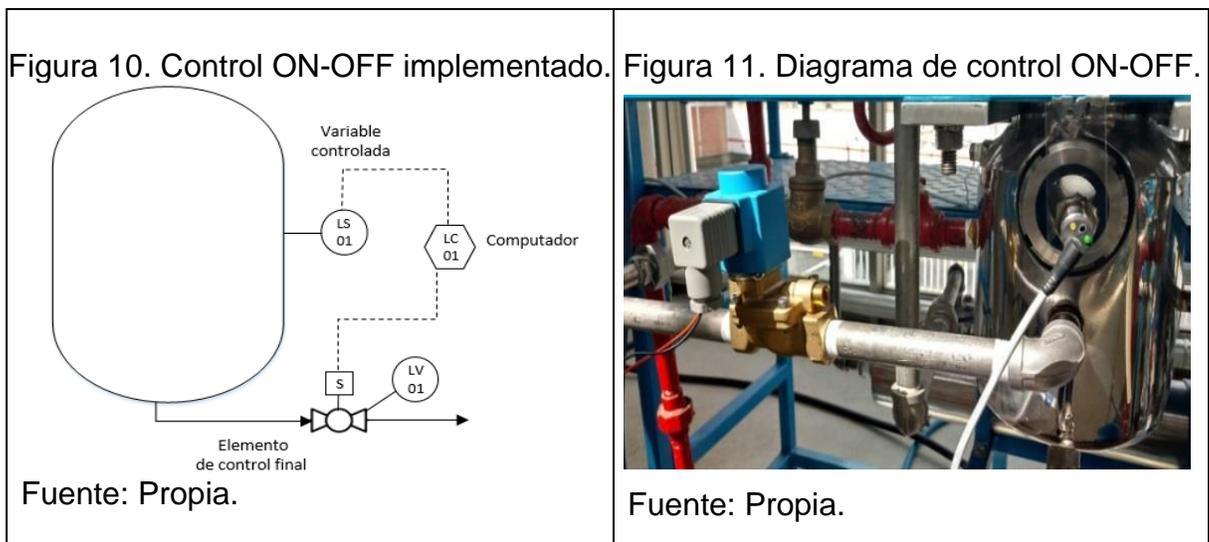
Fuente: Propia

5. ESTRATEGIA CONTROL DE NIVEL

Antes de implementar los montajes se llevó a cabo la selección de la instrumentación de acuerdo a condiciones de proceso, opciones de instrumentación que tenía la universidad y facilidad de permisos (Anexo C).

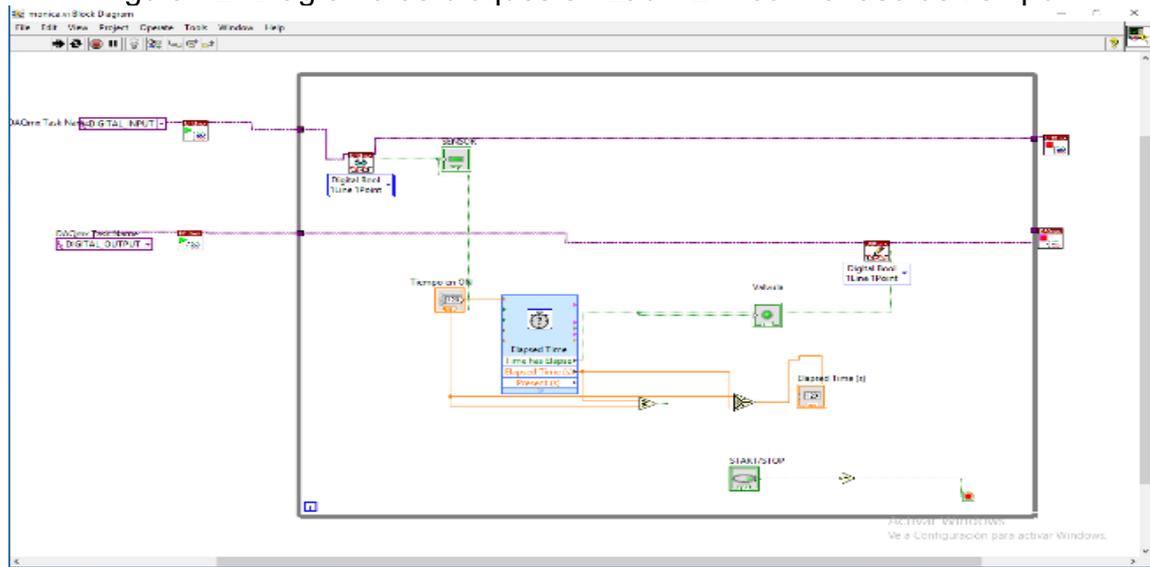
El primero montaje fue un control ON-OFF, como se muestra en la Figura 10 bajo ISA-5.1-2009, donde el sensor de proximidad capacitivo, y la información generada por este elemento de medición se trata usando un acondicionador de señal y se convierte a un formato digital a través de NI USB-6009 (Anexo D), donde el lenguaje de programación gráfica LabVIEW procesa la información. La variable controlada era una válvula ON-OFF normalmente cerrada activada eléctricamente por LabVIEW. La Figura 11 muestra la implementación.

Como se muestra en la Figura 12, la estrategia de control consiste en generar un retardo en la apertura de la válvula solenoide de acuerdo a un parámetro establecido por la interface en segundos, a través de una función de tiempo. Esto se hizo porque no era factible instalar un sensor análogo debido a la turbulencia y los vapores generados.



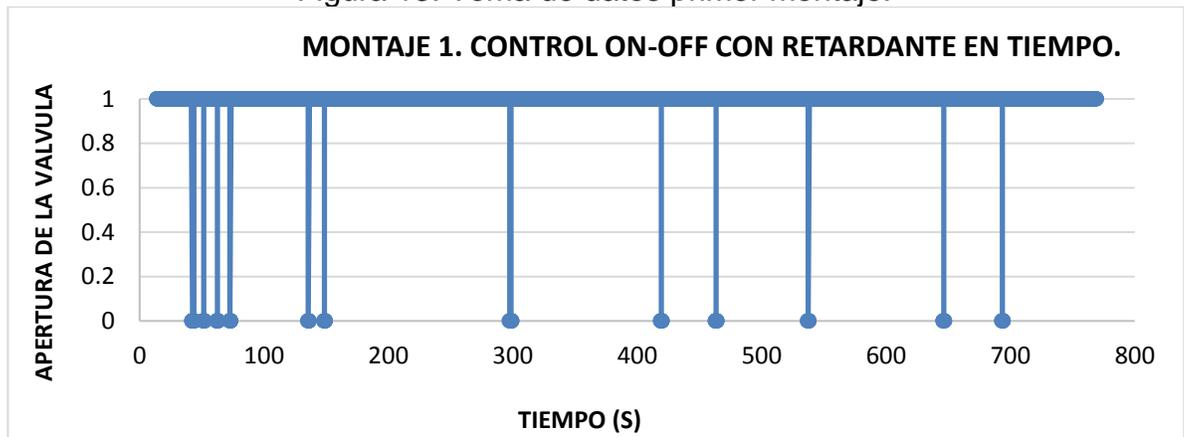
Para el montaje uno, el sistema de control tiene dos estados fijos, sin valores intermedios, como se muestra en la Figura 13 la válvula permanecía un 97% del tiempo abierta, al limitarse a esta posición proporciona poca corrección al sistema (Ibañez, 2010), las temperaturas se incrementarán, se desestabilizará la torre y el destilado no fuera constante. La señal de control está invertida con respecto a la simulación porque la válvula es normalmente está cerrada.

Figura 12. Diagrama de bloques en LabVIEW con retraso de tiempo.



Fuente: Propia

Figura 13. Toma de datos primer montaje.



Fuente: Propia.

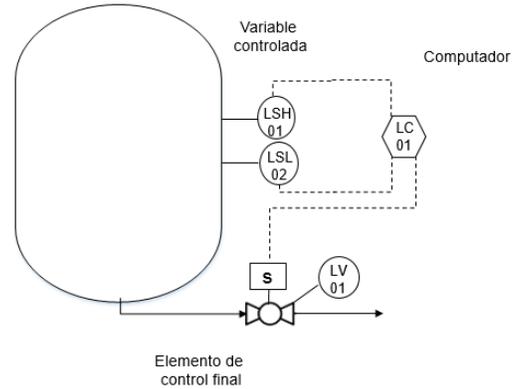
Se realizó una mejora al primer montaje con un control on-off con histéresis; donde se implementaron dos sensores como se muestra en la Figura 14 y Figura 15. Para su implementación (Anexo D) fue necesario una fuente encargada de energizar la válvula solenoide y los sensores, como la válvula solenoide tiene un voltaje de 24 VDC es necesario usar un convertidor LM2596 que reduce la señal a 5 VDC para poder alimentar la tarjeta, de igual manera para los sensores tipo capacitivo se usaron relevos que llevan la señal a la tarjeta.

Figura 14. Montaje de control con histéresis.



Fuente: Propia.

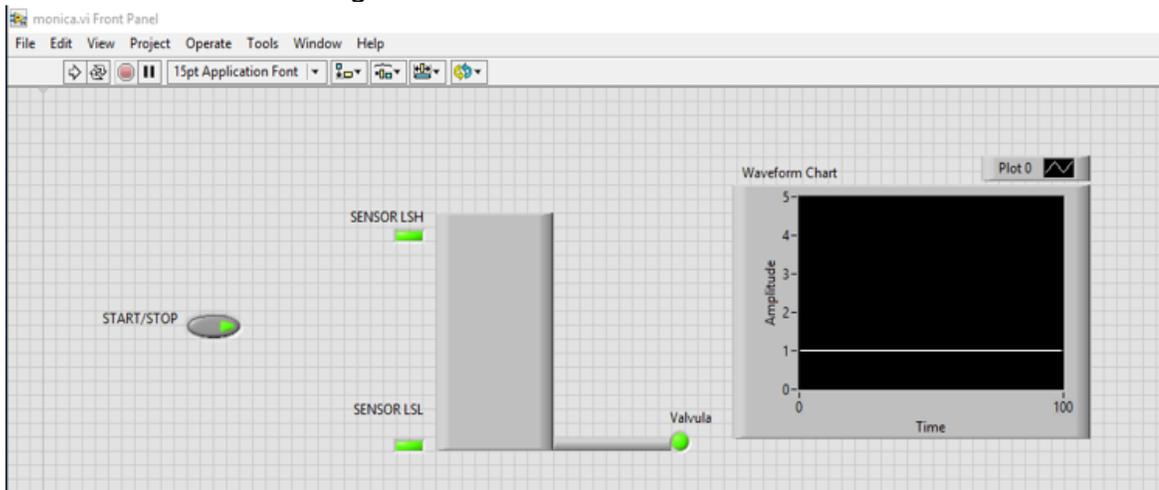
Figura 15. Diagrama por histéresis.



Fuente: Propia.

Dentro del entorno de LabVIEW (Figura 16) el sensor de baja se denominó LSL cuando no registraba nada, le enviaba la señal a la válvula que debía cerrar evitando que se desocupará la torre, en este punto se empieza a llenar hasta que el sensor de alta LSH se encendía. Solo en el punto más alto la válvula se abría, permitiendo que se desocupará la torre y no se inundara.

Figura 16. Panel frontal en Lab View.

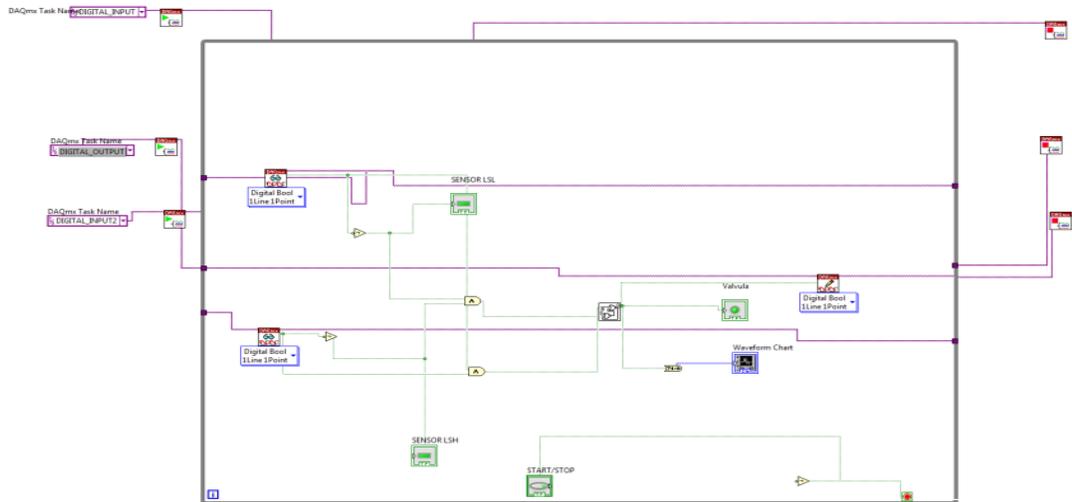


Fuente: Propia.

Como se ve en la Figura 17 el programa recibe una señal de baja y una de alta, solo hasta que recibe la señal de alta, toma la decisión de dar accionamiento a la válvula para que esta se abra y no permita que la torre se inunde esto se lleva a cabo utilizando una subrutina denominada RS flip flop. La válvula solo se cierra si la señal de baja registra un valor de cero. Se utilizó la función waveform chart para

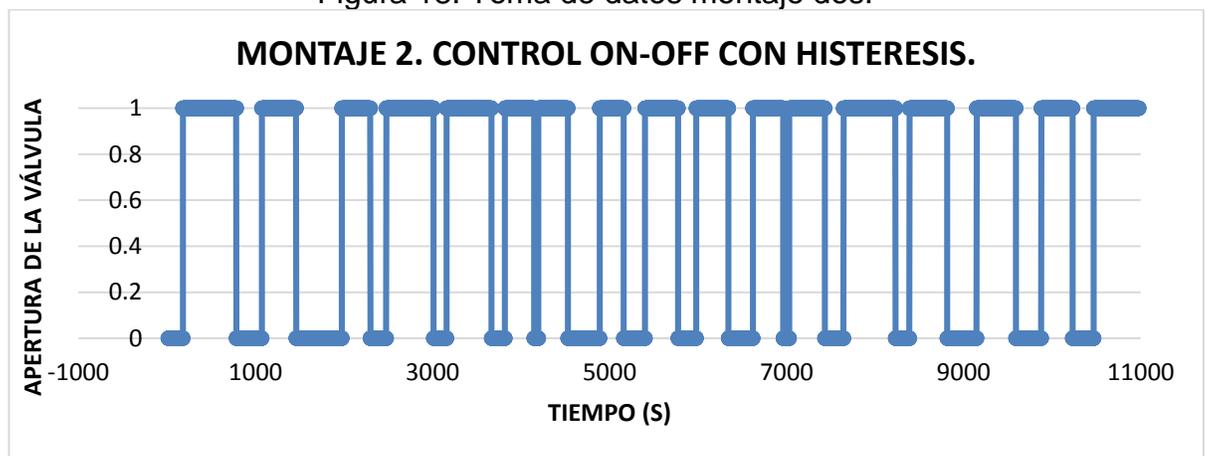
que gráficamente represente el comportamiento de la señal. Sin embargo, la turbulencia que se presentaba marcaba un registro constante de uno, permaneciendo la válvula abierta en un 64% durante las 3 horas de operación como se visualiza en la Figura 18; a diferencia del primer montaje se genera un mejor control al sistema.

Figura 17. Diagrama de bloques control ON-OFF en LabVIEW.



Fuente: Propia.

Figura 18. Toma de datos montaje dos.



Fuente: Propia.

Finalmente, para validar el comportamiento de los dos montajes, se preparó nuevamente la solución de 200 L de una solución etanol-agua al 15% en volumen. Para la preparación se usan 30 L de etanol al 74% grado comercial estos resultados se registran en la tabla 4; la entrada de alimento es de un litro por

minuto que de acuerdo a las prácticas es donde el medidor toma un mejor registro.

Al comparar los resultados de la Tabla 4, el montaje 1 tomo más tiempo en la práctica y no alcanzo la recuperación de etanol del montaje 2, esto se debió a que el primer montaje se desestabilizaba aumentando la entrada de líquido, lo que generaba que las temperatura de la cima se incrementaran, se desestabilizará la torre y el destilado no fuera constante; para el segundo montaje se implementó otro sensor con el fin de operar con histéresis, al tener un control de alta y de baja, la variable que se regula desciende hasta un valor por debajo de la variable de consigna, dando la señal a la válvula para que se cierre y que se abra cuando supera el límite alto, obteniendo una recuperación estable de etanol y manteniendo las temperaturas de la cima de cada columna.

Tabla 4. Control on-off (montaje 1) vs control on-off con histéresis (montaje 2).

Parámetro	Montaje 1	Montaje 2
Temperatura promedio de la cima de la segunda torre (°C)	74	72
Reflujo (No. de vueltas)	4	4
Cantidad de destilado en práctica (L/h)	5	7
Recuperación de etanol (%)	60	77
Tiempo practica (h)	4	3
Alimento preparado (L)	200	200

Fuente: Propia

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró el diseño e implementación de un control de nivel con histéresis en el fondo de la primera columna, con el lazo de control implementado se disminuye el tiempo de estabilización de la torre pasando de 3 horas con prácticas sin sistema de control a 1 hora con la implementación del sistema de control. Adicionalmente, se observó que el sistema indirectamente mejora la estabilidad de la temperatura en la cima de cada columna, reduce la mano de obra de los estudiantes que manipulan la torre y mejora las condiciones de riesgo al evitar el manejo de la válvula manual del fondo que alcanza temperaturas superiores a 90°C.

Debido a que no se podía realizar una toma directa en algunos tramos de la torre. Se destaca la importancia en el uso de programas de simulación como lo es Aspen Hysys, donde se obtuvieron condiciones de proceso tales como: presión y flujos. Adicional, se realizan suposiciones y consideraciones para obtener el balance de energía soportado con el programa.

Con el uso del programa Simulink se representó el diagrama de bloques y se comparó diferentes escenarios donde se observó que la variable de mayor influencia era la entrada de vapor y la formación de burbujas debido al cambio de fase, lo que provoca la inestabilidad de la torre. Por otro lado, se encontró que el controlador es robusto antes de los cambios de ± 0.001 . Con el programa Lab VIEW se llevó a cabo la implementación, donde en tiempo real se obtuvo el comportamiento de la válvula y se consiguió un histórico de datos.

Al comparar las primeras practicas sin control la concentración de etanol que se trabajo era del 86% para este caso se logró recuperar 12 litros en 6 horas con una concentración de etanol del 85%, pese que con el sistema de control implementado se trabajó con una concentración de etanol del 74% se obtuvo mayor concentración de destilado al 77% y se logró recuperar 21 litros en 3 horas de operación.

Los sensores capacitivos son de bajo costo y fácil adaptación ya que funcionan sin contacto; sin embargo, las lecturas se veían influenciadas por la turbulencia generando que la válvula solenoide permaneciera en un 64% del tiempo abierta lo que a futuro genera que la bobina se pueda recalentar. Como trabajos futuros, se propone cambiar la estrategia de control, para lo cual se requiere cambiar la instrumentación. Esto se puede realizar con una adaptación mecánica en la torre, donde se conecta un tubo externo para poner un transmisor de presión diferencial

que pueda medir la diferencia de presión entre el nivel inferior y superior de la torre (Creus Solé, 2011). Por dinero y tiempo, su implementación no fue posible.

Finalmente, se resalta la importancia de unir las áreas de automatización e ingeniería química con el fin de lograr este tipo de proyectos, aunque se logró su implementación, actualmente no se encuentra instalado el lazo de control de nivel; ya que, los materiales pertenecen al área de robótica y las licencias de los programas actualmente son para el uso de las clases.

BIBLIOGRAFÍA

A Smith, C., & B. Corripio, A. (2000). Control Automático de procesos. Teoría y práctica. México D.F: Editorial Limusa, S.A de C.V Grupo Noriega Editores.

Alzate Ibañez, A. M. (Mayo de 2010). Modelado y control de una columna de destilación. 191. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.

AspenTech Inc. (2005). *Aspen Hysys: simulation basis*. Obtenido de <http://www.aspentech.com>

Cardenas Tovar, L. N., & Rodríguez Rivera, N. D. (2016). Automatización De Una Torre De Destilación Para Operación Continua A Escala Laboratorio. Caso De Estudio: Centro De Investigación En Procesos De Ingeniería (C.I.P.I.). Bogotá, colombia: Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Creus Solé, A. (2011). *Instrumentación Industrial* (Vol. VIII). México: Marcombo.

Franco Ocampo, D. F., & Franco Mejía, E. (2015). Emulación de una columna de destilación binaria continua para propósitos de formación en control. *UIS Ingenierías*, 14(2), 7-17.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Norma Técnica Colombiana. Referencias Bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C.: El Instituto, 2008. 38p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Norma Técnica Colombiana. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C.: El Instituto, 2008. 41p.

Lázaro Castillo, I. I. (2008). *Ingeniería de Sistemas de Control Continuo*. México: Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo. Obtenido de http://isidrolazaro.com/wpcontent/uploads/2013/01/Preview_Control_Continuo_1ed.pdf

Luyben, W. L. (2014). *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers* (Vol. Second Edition). McGraw Hill Education India Private Limited.

National Instruments. (2014). *Adquisición de datos*. Obtenido de <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

Navas Herrera , S. J. (2014). *Control de Columnas de Destilación*. Universidad de Sevilla. Obtenido de

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20374/fichero/Proyecto+completo.pdf>

Ogunnaike, B. A., & Harmon Ray, W. (1994). *Process dynamics, modeling, and control*. New York: Oxford University Press.

Poling, B. E., Prausnitz, J. M., & O'Connell, J. P. (2004). *The Properties of Gases and Liquids* (Fifth Edition ed.). McGraw-Hill Companies.

Richmond Salazar, E. (2009). Diseño y construcción de una interfaz de control de nivel, temperatura y flujo de agua en un tanque para uso en prácticas de laboratorio. San Jose, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Villacruz Guijarro, G. E. (2011). Automatización y puesta en marcha de una columna de destilación continua de platos perforado tipo experimental para el sistema etanol-agua mediante PID y plataforma LabView denominada (UDCC). Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil.

ANEXOS

ANEXO A. Reconocimiento de la torre

Para su reconocimiento se desmontaron los platos de la torre Figura 19, se tomaron medidas Figura 20 y se validó su configuración interna Figura 21. Donde se llevó a cabo el mantenimiento de la misma.

Figura 19. Desmonte de los platos.



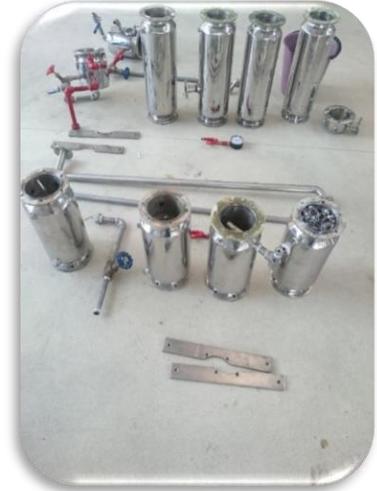
Fuente: Propia

Figura 20. Toma de medidas.



Fuente: Propia

Figura 21. Internos de la torre.

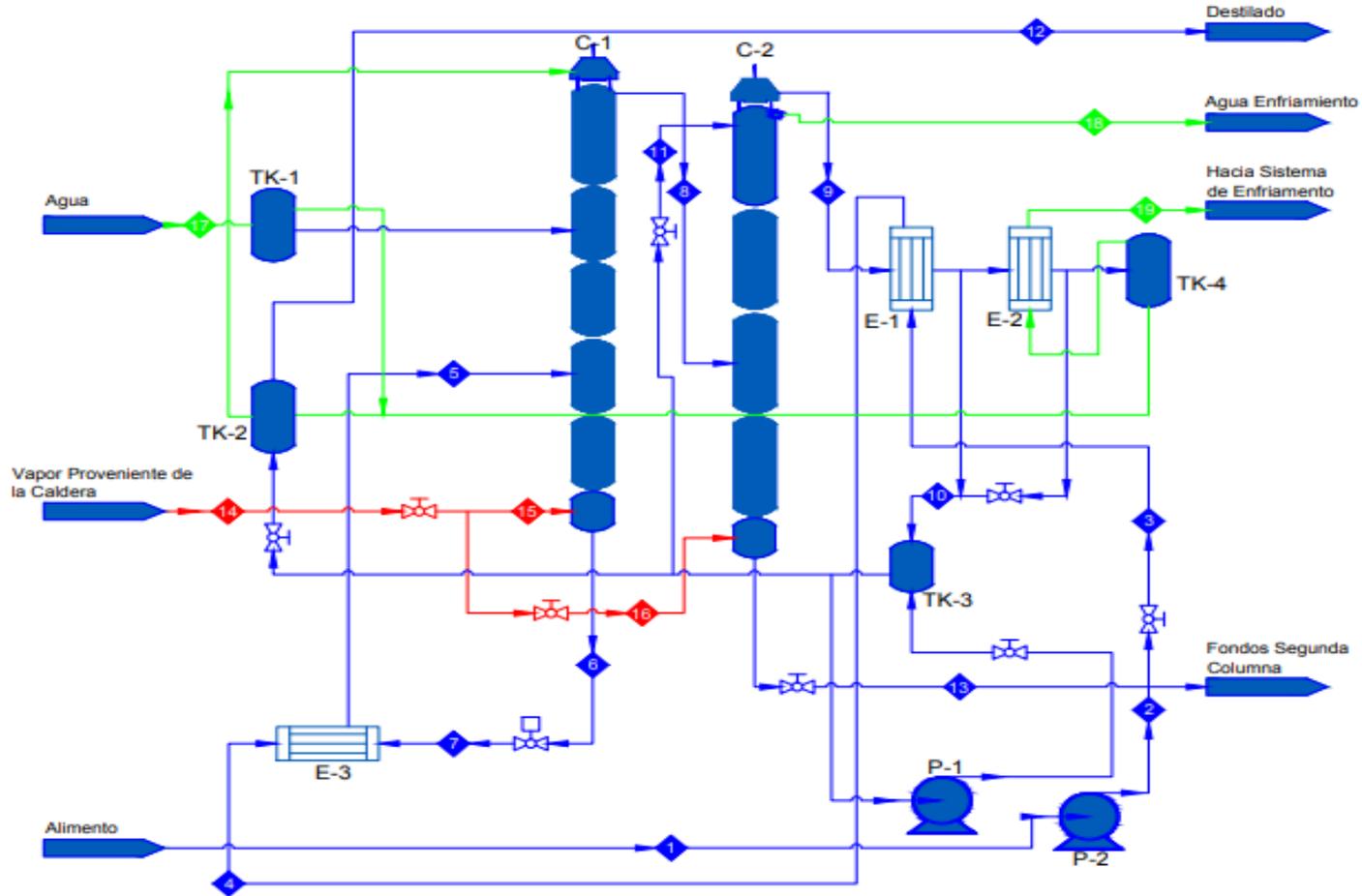


Fuente: Propia

ANEXO B. PFD Y P&ID del proceso

Figura 19. PFD de la torre de destilación del CIPI.

C-1	P-1	E-3	TK-2	E-2	TK-1
TORRE DESTILACIÓN	BOMBA DE REFLUJO	PRE-CALENTADOR DEL ALIMENTO	TANQUE DE DESTILADO	CONDENSADOR VAPOR RECTIFICADO	CONDENSADOR VAPOR DE DESTILADO
C-2	P-2	TK-3	E-1	TK-4	
TORRE RECTIFICACIÓN	BOMBA DE ALIMENTACIÓN	TANQUE DE DESTILADO ANTES DE REFLUJO	PRIMER PRE-CALENTADOR	CONDENSADOR VAPOR RECTIFICADO	



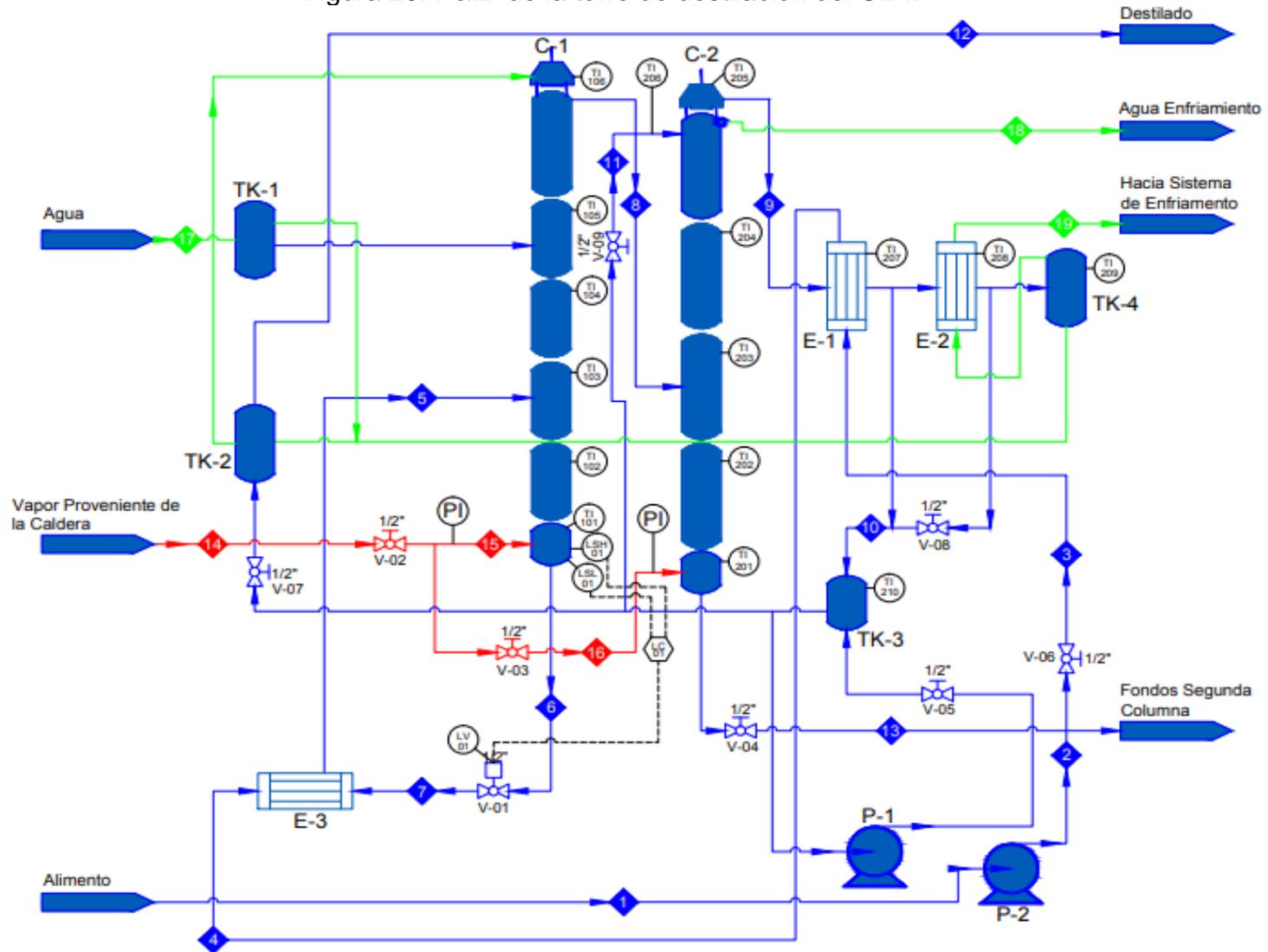
Fuente: Propia.

Tabla 5. Resultados de las corrientes bajo simulación.

Parámetro	1	2	3	4	5	6	7
	Alimento	Alimento paso por bomba	Alimento primer precalentador	Alimento segundo precalentador	Alimento entrando a la torre	Salida fondos primera columna	Fondos después del solenoide
Fracción de Vapor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Temperatura [°C]	18.00	18.00	18.00	35.00	55.00	92.32	92.32
Presión [kPa]	75.53	76.53	76.53	76.53	76.53	76.53	75.40
Flujo de volumen [m ³ /h]	1.69e-2	1.69e-2	1.69e-2	1.69e-2	1.69e-2	1.59e-2	1.59e-2
Parámetro	8	9	10	11	12	13	14
	Entrada segunda torre	Salida destilado segunda columna	Destilado a tanque de almacenamiento	Reflujo	Destilado	Fondos segunda columna	Entrada de vapor
Fracción de Vapor	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Temperatura [°C]	92.32	76.76	76.76	76.76	76.76	92.32	92.32
Presión [kPa]	76.53	73.00	73.00	73.00	73.00	76.53	76.53
Flujo de volumen [m ³ /h]	1.72e-2	3.00e-3	3.00e-3	4.91e-2	3.00e-3	3.33e-2	1.62e-2
Parámetro	15	16	17	18	19		
	Entrada Vapor primera torre	Entrada Vapor segunda torre	Agua enfriamiento	Salida agua enfriamiento	Hacia sistema de enfriamiento		
Fracción de Vapor	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00		
Temperatura [°C]	92.32	92.32	18.00	18.00	18.00		
Presión [kPa]	76.53	76.53	75.53	75.53	75.53		
Flujo de volumen [m ³ /h]	1.62e-2	1.62e-2	1.52e-2	1.52e-2	1.42e-2		

Fuente: Propia.

Figura 20. P&ID de la torre de destilación del CIPI.



Fuente: Propia.

ANEXO C. Instrumentación

Válvula Solenoide

El elemento de control final seleccionado fue una válvula solenoide, son económicas y solo requieren una fuente de energía adecuada, donde su propósito es regular el flujo manipulado en el sistema de control. (Smith & Corripio, 2000).

La capacidad de flujo de una válvula de control está determinada por su factor de capacidad o coeficiente de flujo (C_v), introducido en 1944 por los fabricantes de válvulas Masoneilan International, Inc. (A Smith & B. Corripio, 2000), despejando de la ecuación 5, donde los fondos de la primera columna se obtienen a una velocidad de 0,269 gpm, considerando que la válvula está abierta vp es igual a 1, se obtiene que el valor de C_v es de 0.31 gpm/psi^{0.5} con este factor de capacidad y las características que se muestran en la Tabla 6, se seleccionó la válvula solenoide.

Tabla 6. Características de la válvula solenoide.

Parámetro	Valor
Medio	Agresivo, Vapor
Material interno	Acero inoxidable
Cuerpo	Bronce latón
Sellos	EPDM
Acción del actuador	NC
Conexión	1/2"
Temperatura	140 °C
Voltaje	24 V

Fuente: Propia

Sensor Capacitivo

El elemento primario propuesto por (Cardenas Tovar & Rodríguez Rivera, 2016) era un sensor tipo flotante; sin embargo, al destapar la torre se encontraba una flauta, la cual no permite el desplazamiento de la boya, se tuvo que descartar esta alternativa.

Se emplearon sensores de tipo capacitivo (Ver Tabla 7), encargados de manipular la variable de nivel de alta y baja con el apoyo de la constante dieléctrica del agua.

Al sentir la presencia del fluido el diodo luminoso (LED) se enciende.

Tabla 7. Características del sensor.

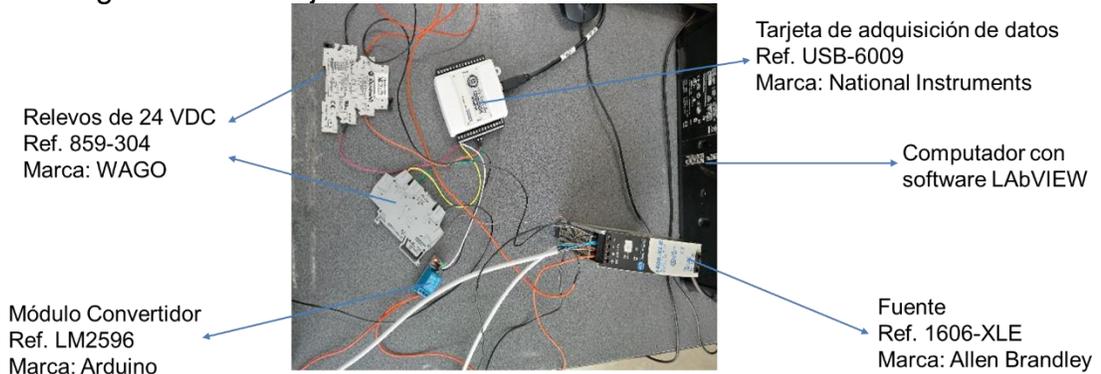
Parámetro	Valor
Tensión de funcionamiento admisible	12 – 48 V DC
Salida de conmutación	PNP, normalmente abierto
Material Tapa frontal	PTFE
Material cuerpo	Latón niquelado
Tipo de montaje	A ras
LED para la tensión de alimentación	Verde
Elemento de conmutación «ON» LED	Amarillo
Conexión eléctrica	Cable de 2000 mm

Fuente: Propia

ANEXO D. Montaje y conexionado

En la Figura 21 se aprecian los materiales que integraron el montaje final del sistema de control implementado por histéresis. Las cuales, se consiguieron por parte del área de robótica de la universidad.

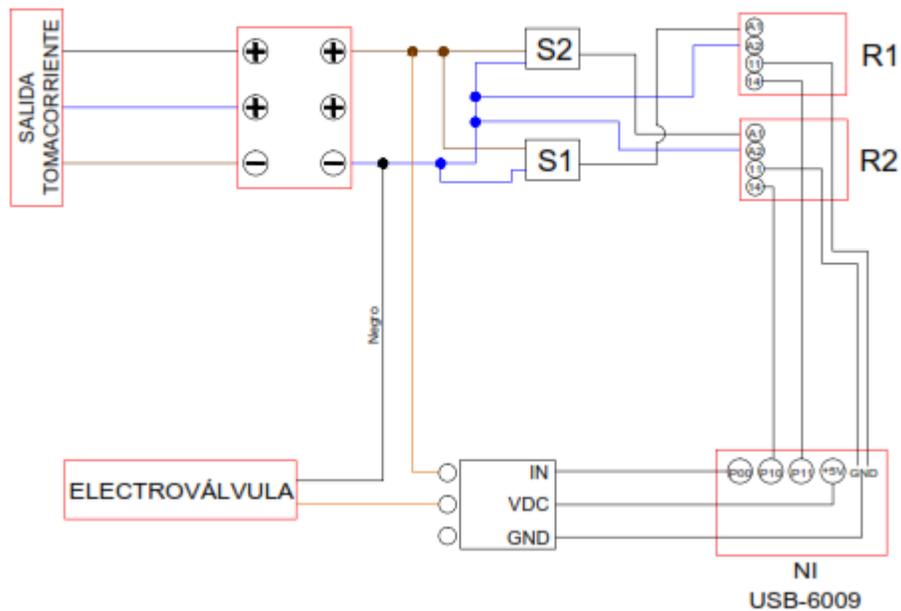
Figura 21. Montaje del conexionado eléctrico del sistema de control.



Fuente: Propia.

Para dar claridad, en la Figura 22 se muestra el conexionado eléctrico de los materiales para su montaje.

Figura 22. Esquema de conexionado eléctrico del sistema de control.



Fuente: Propia.