



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITES
ESENCIALES DE LA EMPRESA FINCA BOTÁNICA AROMÁTICA S.A.”**

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

Presentado por:

JOSÉ IGNACIO CAIZA CASTRO

DANIEL OMAR MORÁN GUTIÉRREZ

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien no se cansa de proveer sabiduría, perseverancia y salud para vencer los obstáculos en mi camino.

A mis padres por inculcarme el valor de la responsabilidad y honestidad, los que han sido mis pilares fundamentales en todos los retos que se me han impuesto, por su paciencia y constante desvelo para poder recibir la mejor educación posible.

Y a mis amigos y profesores por compartir su tiempo y conocimientos de forma desinteresada, permitiéndome aprender hasta de la simplicidad más mínima de cada día.

José Ignacio Caiza Castro

Profundamente agradecido con Dios, ya que tuve la oportunidad de tener una buena familia que supo ayudarme a cumplir este objetivo.

A todas las personas que me ayudaron en este camino, mis amigos y mi familia. El camino que recorrí no lo hice solo, siempre me sentí acompañado por todos.

A mis profesores por aportarme invaluable conocimiento y ayuda desinteresada, siempre los tendré presente como el pilar de mi experiencia profesional con profundo agradecimiento.

Daniel Omar Moran Gutierrez

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mis padres por ser los pilares fundamentales de mi existencia, dedicando todos los esfuerzos logrados durante mi vida y aún más en culminar esta etapa y a mi amigo Freddy Bustos Cerda (+), quien con su alegría y paz me enseñó a valorar más cada persona que llega a mi vida.

José Ignacio Caiza Castro

El presente proyecto se lo dedico a Dios y a mis padres por ser los pilares fundamentales de mi existencia, dedicando todos los esfuerzos logrados durante mi vida y aún más en culminar esta etapa.

Daniel Omar Moran Gutierrez

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

José Ignacio Caiza Castro

Daniel Omar Morán Gutiérrez

EVALUADORES

Msc. Damián Larco Gómez

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Douglas Plaza Guingla

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente proyecto se orienta hacia la solución de los problemas presentados en la empresa Finca Botánica Aromática S.A. debido a la ausencia de la automatización en el proceso de extracción de aceites esenciales, con la finalidad de contar con una óptima regulación de las variables físicas involucradas y rechazar perturbaciones debido a posibles pérdidas de vapor, a través de la instrumentación de las diferentes etapas del proceso y el empleo de un controlador lógico programable para la supervisión y control.

Las herramientas que se emplearon para la identificación de la dinámica del sistema son las disponibles en el software Matlab, permitiendo introducir los datos captados durante el funcionamiento del proceso y determinar las constantes del reactor de destilación que definen su operación, para luego ser empleadas en una técnica de control que permita el rechazo a perturbaciones.

Finalmente, para la evaluación de resultados se definió una conexión cliente – servidor que permitió simular el comportamiento del reactor de destilación, y mediante la programación de un controlador lógico programable se obtienen las curvas de reacción dentro del reactor, se evidenció el efecto del control y la automatización; tanto en el monitoreo, como en el comportamiento de las variables dentro del proceso industrial, permitiendo conocer su desempeño en tiempo real.

Palabras Clave: automatización, control en cascada, reactor de destilación, rechazo de perturbaciones.

ABSTRACT

This project is aimed to giving practical solutions to the issues found at the factory Finca Botanica Aromatica S.A. due to the absence of a proper automation in the process of steam distillation for essential oils extraction. By this solution the factory will count with an optimum regulation of the physical variables involved a will be able to reject possible disturbances related to pressure loss. Through the different process stage instrumentation, and the use of a programmable logic controller for supervision and control, the goals are achieved.

The tools that were used for identification of the system dynamic are the ones available on the software MatLab, allowing to introduce de data caught during the process operation and determining the distillation reactor constants which defines its operation. Then, this are used in a control technique in order to reject disturbances.

Finally, for the results evaluation a connection client – server was established, which allowed simulate the distillation reactor behaviour, and through a programmable controller the reaction curves inside the reactor are obtained. In conclusion, the automation and control effect are shown, during the monitoring, and the behaviour of the variables in the industrial process, allowing to know the performance in real time.

Keywords: automation, cascade control, steam distillation, disturbances rejection.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	4
EVALUADORES.....	6
RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Marco Teórico	3
1.3.1 Descripción del proceso para la extracción de aceites esenciales.....	3
1.3.2 Automatización y Control Industrial	6
1.3.3 Instrumentación Industrial	7
1.3.4 Identificación de sistemas	9
1.3.5 Sistemas de primer orden con retardo (FOPDT).....	9
1.3.6 Sistema de control en lazo cerrado	10
1.3.7 Lazo de control en cascada	10
1.3.8 Control por el Modelo Interno (IMC)	11
1.3.9 Control aplicado al proceso de destilación de aceites esenciales.....	12
CAPÍTULO 2.....	13

2.	Metodología	13
2.1	Identificación del modelo matemático del reactor de destilación	13
2.2	Análisis de la estructura de control para regulación de temperatura en el reactor de destilación.....	14
2.3	Estructura del lazo de control en cascada	15
2.4	Aplicación de técnica IMC para sintonización de parámetros de controladores PID del lazo de control.....	17
2.5	Instrumentación de la planta según requerimientos del sistema	17
2.6	Implementación del lazo de control en comunicación OPC entre Simulink y Studio 5000.....	19
CAPÍTULO 3.....		23
3.	ANÁLISIS DE Resultados	23
3.1	Análisis de resultados en entorno de MatLab & Simulink	23
3.1.1	Identificación de la planta (estación de destilación)	23
3.1.2	Implementación de control en cascada en el entorno de SimuLink.....	25
3.1.3	HMI utilizando Factory Talk Machine Edition	26
3.1.4	Simulación de la planta interactuando con el controlador	27
3.1.5	Comunicación entre la simulación y el controlador	28
3.2	Hardware	29
3.2.1	Controlador implementado en el PLC	29
3.3	Análisis de costos	29
CAPÍTULO 4.....		32
4.	Conclusiones Y RECOMENDACIONES	32
	Conclusiones	32
	Recomendaciones	34
BIBLIOGRAFÍA.....		35

ANEXOS	37
Anexo A1	37
Anexo A2	40
Anexo A3	41

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FOPTD	First Order Plus Time Delay
PLC	Programmable Logic Controller
HMI	Human – Machine Interface
IMC	Intern Model Control
OPC	Open Platform Communication
GUI	Graphic User Interface
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
SISO	Single Input – Single Output

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Hojas de Ylang Ylang durante el proceso de secado	3
Figura 1.2 Reactor de destilación empleado para la obtención de datos.....	4
Figura 1.3 Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceites esenciales	5
Figura 1.4 Red de automatización con un entorno de comunicación OPC	6
Figura 1.5 Estación de entrenamiento con PLC (serie ControlLogix 5500) de la marca Rockwell Automation	6
Figura 1.6 (a) Transmisor industrial de flujo de vapor, (b) Válvula inteligente tipo globo para control de flujo	8
Figura 1.7 Diagrama P&ID de un reactor con dos entradas de vapor y sus respectivos controladores	9
Figura 1.8 Respuesta de un sistema FOPDT (rojo) frente a una entrada escalón unitario (azul).....	10
Figura 1.9 Sistema de control de lazo cerrado.....	10
Figura 1.10 Diagrama de bloques de un Control en Cascada (multilazo).....	11
Figura 1.11 Diagrama de bloques planteado por García y Morari para la técnica de control por el modelo interno (IMC).....	12
Figura 2.1 Diagrama P&ID del proceso para extracción de aceites esenciales por arrastre de vapor empleado para la identificación del sistema	14
Figura 2.2 Diagrama de bloques del sistema actual operando en lazo abierto.....	15
Figura 2.3 Esquema de control en cascada con la presión como variable de perturbación y número de vueltas como variable manipulada	16
Figura 2.4 Diagrama P&ID incluyendo la estructura de control en cascada para la regulación de temperatura en el interior del reactor.....	18
Figura 2.5 Simulación de proceso controlado para extracción de aceites esenciales, mediante comunicación OPC.....	19
Figura 2.6 Sistema de simulación implementado en Simulink	20
Figura 2.7 Conexión entre la simulación y el PLC	21
Figura 2.8 Visualización de las variables de control en el HMI	22

Figura 3.1 Respuesta a una entrada escalón unitario del modelo matemático del reactor de destilación obtenido mediante análisis de la curva de reacción.....	23
Figura 3.2 Diagrama de bloques del estado actual de la sección de destilación junto incluyendo la variable de perturbación.....	24
Figura 3.3 Respuesta del sistema en lazo abierto frente a entrada escalón con consigna de 50 [°C] y perturbación como caída de presión	25
Figura 3.4 Lazo de control en cascada, considerando controlador interno y externo para la evaluación del tracking de la consigna y rechazo de perturbaciones	25
Figura 3.5 Respuesta de la aplicación del sistema de control en cascada evidenciando el tracking del setpoint y el rechazo a la perturbación.	26
Figura 3.6 HMI monitoreando las variables del proceso	27
Figura 3.7 Cambio de setpoint desde la pantalla HMI	28
Figura 3.8 Variables utilizadas en la comunicación OPC.....	29
Figura 3.9 Controladores implementados en el PID	29
Figura 3.10 Propuesta de topología de red para el proceso de destilación de aceites	31
Figura 4.1 Comportamiento de la temperatura en el experimento 1	37
Figura 4.2 Comportamiento de la temperatura en el experimento 2	37
Figura 4.3 Comportamiento de la temperatura en el experimento 3	38
Figura 4.4 Comportamiento de la temperatura en el experimento 4	38
Figura 4.5 Comportamiento de la temperatura en el experimento 5	39
Figura 4.6 Comportamiento de la temperatura en el experimento 6	39
Figura 4.7 Proceso de extracción de aceites esenciales mediante el método de destilación por arrastre de vapor.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Elementos que conforman al reactor de destilación	4
Tabla 2.1 Valores de parámetros definidos para la realización de los experimentos en el reactor de destilación.	13
Tabla 2.2 Detalle de las variables utilizadas en el controlador	21
Tabla 3.1 Detalle de los costos totales	30
Tabla 4.1 Valores de parámetros para el experimento 1	37
Tabla 4.2 Valores de parámetros para el experimento 2	37
Tabla 4.3 Valores de parámetros para el experimento 3	38
Tabla 4.4 Valores de parámetros para el experimento 4	38
Tabla 4.5 Valores de parámetros para el experimento 5	39
Tabla 4.6 Valores de parámetros para el experimento 6	39

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el control del proceso industrial para la extracción de aceites esenciales que se lleva a cabo en la empresa Finca Botánica Aromática S.A. es de forma empírica y manual, donde el operador a través de una técnica de prueba y error realiza el ajuste de variables físicas como presión y flujo de vapor, bajo un contexto donde la instrumentación digital es nula.

Luego de realizarse la respectiva visita de campo y conversaciones con la gerencia, se evidencia el interés por dar el siguiente paso hacia el entendimiento sobre la operación del proceso según determinados ajustes que se establezcan en las variables previamente citadas; es decir, definir sus puntos de operación, estableciendo la variable a manipular y la que será controlada, para luego ver su efecto tanto en el rendimiento como en la calidad del producto

El componente principal donde se llevan a cabo los intercambios energéticos es el reactor de destilación; por lo que resulta necesaria su identificación y que, a través de la toma de datos y herramientas computacionales como Matlab, nos permiten establecer un modelo matemático que describa su comportamiento; para luego, asegurar el correcto desempeño de las variables que intervienen en el proceso, mediante la instrumentación de la planta en conjunto a la automatización mediante el empleo de un PLC en donde se configurará un lazo de control en cascada.

Con el propósito de establecer un sistema de control que sea capaz de rechazar perturbaciones de presión provenientes de los ciclos de histéresis del caldero que alimenta a las líneas de vapor, se emplea la técnica de control por el modelo interno IMC (de sus siglas en inglés), la que permite recuperar la temperatura dentro del reactor de destilación, y que en su efecto ocasiona que el proceso industrial continúe operando en un entorno estable a través de la instrumentación y control.

1.1 Descripción del problema

Finca Botánica Aromática S.A. es una empresa dedicada a la extracción de aceites esenciales a partir de especies de plantas que son cultivadas en sus propias haciendas en la localidad de Chongón.

Se evidencia que la operación de la planta de destilación de aceites es ejecutada de forma manual sin contar con la instrumentación y automatización adecuadas. Esto conlleva a que los propietarios de la empresa no tengan algún control sobre la calidad o rendimiento en la producción del aceite.

En reuniones con el gerente de producción de la empresa mencionada, se presenta el interés por identificar variables del proceso que pueden ser controladas, con la finalidad de disminuir las pérdidas en el flujo de vapor frente al accionar de variables de perturbación; y que, a su vez, permita una óptima regulación de las variables físicas que intervienen en el proceso de extracción de aceites esenciales.

Por lo tanto, en el presente proyecto se plantea la automatización del proceso industrial, permitiendo conocer el comportamiento de las variables físicas involucradas (presión, flujo de vapor, temperatura), mediante su adquisición y monitoreo, además del control de la variable temperatura en el interior del reactor de destilación considerando el efecto de la presión como variable de perturbación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar el sistema de automatización del proceso de extracción de aceites esenciales de la hoja del árbol Ylang – Ylang en la empresa Finca Botánica Aromática S.A., mediante la instrumentación, control y

supervisión del sistema; para una óptima regulación de las variables del proceso.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Instrumentar las diferentes etapas que intervienen en el proceso mediante la selección de actuadores, transductores, interfaz hombre – máquina (HMI) y controlador lógico programable (PLC) para la supervisión y control.
- Identificar el modelo matemático del proceso, en diferentes escenarios para el entendimiento de su dinámica y emplearlo en un esquema cliente – servidor para la evaluación de resultados.
- Elaborar un lazo de control en cascada, basado en la técnica de control por el modelo interno (IMC) para cumplir con el rechazo de las perturbaciones y una rápida dinámica en el reactor de destilación.

1.3 Marco Teórico

1.3.1 Descripción del proceso para la extracción de aceites esenciales

- **Ylang Ylang**

El árbol de Ylang Ylang tiene el nombre científico de *Cananga Odorata* y normalmente se encuentra en bosques húmedos de las Islas del Pacífico y Asia, como: Polinesia, Filipinas, Java, Sumatra y Comoro. La hoja del árbol Ylang Ylang tiene un aroma suave y agradable que lo ha convertido en una esencia adecuada para ser utilizada en productos como cremas o perfumes. A la esencia de esta hoja se le atribuyen propiedades de tipo antidepresivas [1], relajantes [2] y antiinflamatorias [3].



Figura 1.1 Hojas de Ylang Ylang durante el proceso de secado

- **Reactor de destilación**

El reactor de destilación consta de una olla de presión, entradas y salidas de vapor, indicadores de temperatura y presión; además de un condensador y decantador. La olla de presión es el elemento en el cual se deposita el material del que será extraído el aceite esencial.

La entrada de vapor permite recibir el vapor enviado desde el caldero, para luego ser distribuido en el interior de la olla de presión una vez que las hojas hayan sido depositadas en él. EL flujo de vapor de entrada es controlado mediante una válvula de paso rápido que permite ajustar la cantidad de vapor enviado al reactor de destilación.

La salida de vapor está conectada al condensador lo que permite direccionar el vapor hacia la etapa de condensación del aceite, en donde el condensador enfría el vapor que contiene agua y aceite esencial convirtiéndolo en una esencia acuosa,

Finalmente, el decantador se encarga de separar el aceite esencial de las hojas debido a que el aceite se acumula en la parte superior del decantador, debido a la diferencia de densidades entre estos dos líquidos.



No.	Elemento
1	Olla de presión
2	Entrada de vapor
3	Salida de vapor
4	Condensador
5	Decantador

Tabla 1.1 Elementos que conforman al reactor de destilación

Figura 1.2 Reactor de destilación empleado para la obtención de datos

- **Aceite Esencial**

Son productos aromáticos que se obtienen de las plantas, mediante destilación usualmente utilizando agua o vapor en un proceso termodinámico. A través del método de arrastre de vapor, se utiliza una máquina de destilación.

- **Proceso de extracción de aceites esenciales**

El proceso de extracción de aceites esenciales se aprecia en el diagrama de flujo de la Figura 1.3

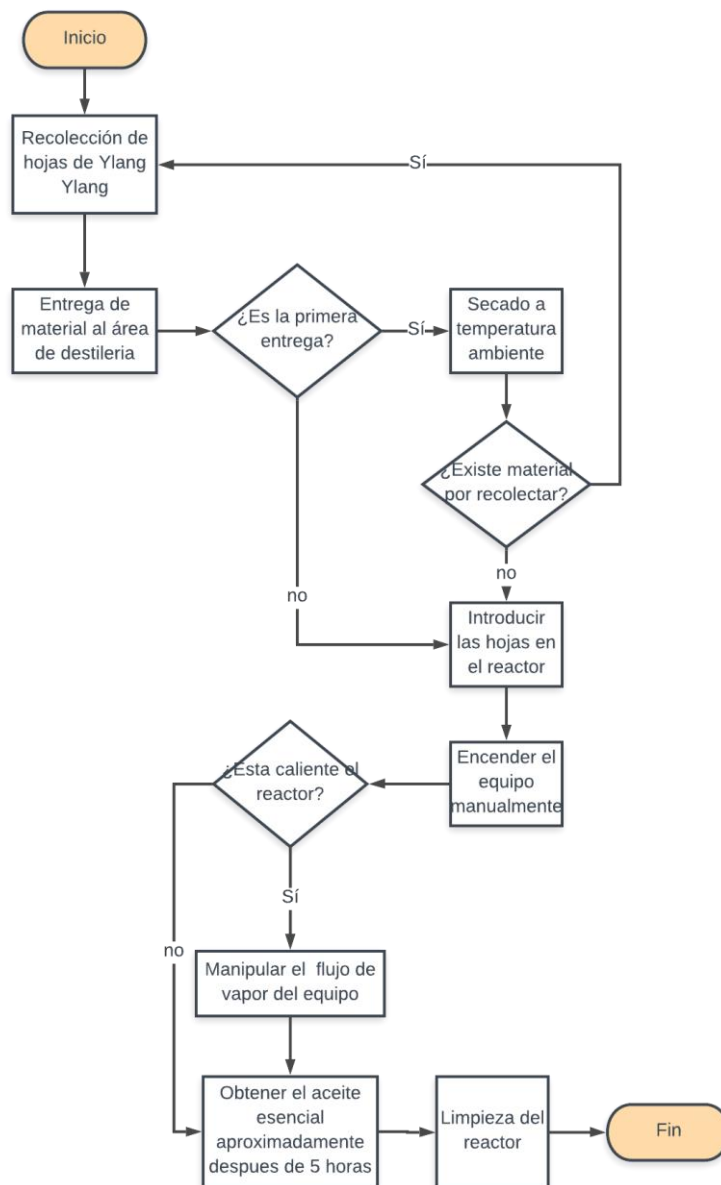


Figura 1.3 Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceites esenciales

1.3.2 Automatización y Control Industrial

La automatización industrial se fundamenta en el uso de elementos eléctricos y mecánicos para la optimización de procesos industriales mediante el empleo de la instrumentación industrial, los sistemas control y supervisión junto a herramientas de software para la adquisición y transmisión de datos en tiempo real.

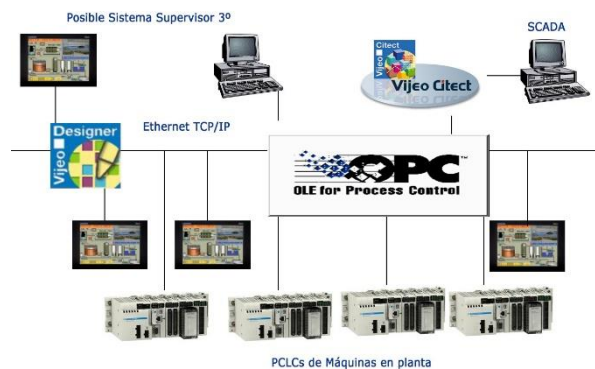


Figura 1.4 Red de automatización con un entorno de comunicación OPC

- **PLC (Programmable Logic Controller)**

Es un dispositivo lógico programable que se utiliza para automatizar procesos industriales debido a que dispone de múltiples puertos para señales de entrada y salida, además de soportar condiciones industriales con las debidas certificaciones. En él se pueden programar secuencias lógicas según los valores de entrada para obtener comportamientos deseados en la salida logrando automatizar un proceso según los requerimientos del sistema.



Figura 1.5 Estación de entrenamiento con PLC (serie ControlLogix 5500) de la marca Rockwell Automation

- **OPC (Open Platform Communication)**

Es un protocolo de comunicación con un esquema cliente – servidor que permite leer/escribir las variables almacenadas en un PLC. La particularidad de este protocolo es que es un estándar abierto lo que logra interoperabilidad entre dispositivos de diversos fabricantes.

- **Studio 5000 Logix Designer**

Es el software de la compañía Rockwell Automation para la programación de sus dispositivos industriales como PLC, servomotores, variadores. Este programa combina elementos ingeniería y diseño para crear una sola interfaz que permita la configuración de dichos equipos.

- **FactoryTalk View Machine Edition**

Es el software dedicado a la creación de pantallas HMI que luego pueden ser simuladas y transferidas utilizando FactoryTalk Communication en las pantallas PanelView.

- **Interfaz Gráfica de Usuario**

La interfaz gráfica de usuario, también conocida como GUI (Graphical User Interface), es una herramienta informática que permite crear un vínculo visual entre el usuario y un determinado proceso junto a los elementos que lo conforman, con el objetivo de proporcionar una fácil interacción entre usuario y máquina, con todas las acciones posibles en una plataforma y sin la necesidad de disponer de profundos conocimientos de informática. [4]

1.3.3 Instrumentación Industrial

Son equipos con capacidades de funcionamiento en ambientes industriales que se utilizan para controlar, transmitir y medir variables de un proceso con el objetivo de mantener un control o registro sobre estas, para lograr una debida optimización y supervisión del proceso.

- **Transmisores y Actuadores**

Los transmisores son dispositivos capaces de receptar estímulos externos de un proceso; tales como temperatura, presión, caudal, nivel, humedad, etc., indicando el estado de estos, para luego transmitirlos a un instrumento receptor y emplear dichos datos para la creación de registros o realizar un control sobre una determinada variable del proceso.

Los actuadores interactúan con el entorno modificándolo debido a que tienen la capacidad motora de generar un cambio sobre un proceso mediante la transformación de energía eléctrica, hidráulica o neumática en un proceso industrial, como las válvulas para control de flujo.

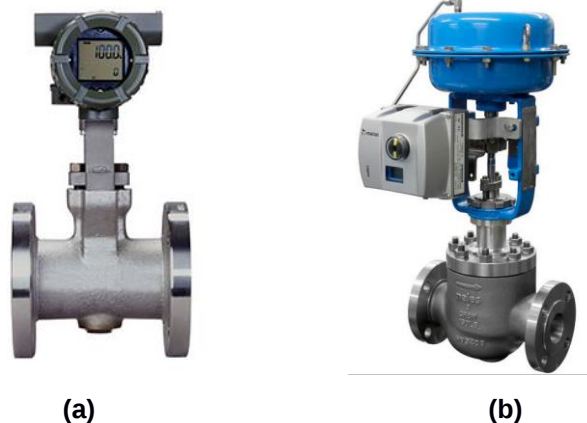


Figura 1.6 (a) Transmisor industrial de flujo de vapor, (b) Válvula inteligente tipo globo para control de flujo

- **Diagrama de tuberías e instrumentación**

Este diagrama sirve para describir procesos industriales mostrando la ruta de las tuberías además de la conexión de los instrumentos y equipos instalados. Usualmente abreviado como P&ID, estos diagramas son fundamentales para el mantenimiento y modificación del proceso; así también, para mantener la seguridad de la planta como parte de la Gestión de Seguridad de Procesos (PSM).

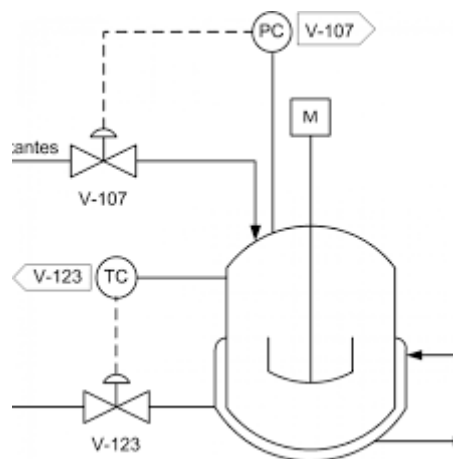


Figura 1.7 Diagrama P&ID de un reactor con dos entradas de vapor y sus respectivos controladores

1.3.4 Identificación de sistemas

La identificación de sistemas lidia con el problema de crear modelos matemáticos de sistemas dinámicos basados en los datos observados durante su funcionamiento.

La ciencia realmente trata de inferir modelos basado en estudios de propiedades y observaciones. Estos modelos (“hipótesis”, “leyes de la naturaleza”, etc.) tratan de enlazar observaciones en algún patrón que puede ser más o menos de carácter formal. Las técnicas de identificación de sistemas son ampliamente usadas en la identificación de sistemas dinámicos debido a que éstos son abundantes en el mundo real. [5]

1.3.5 Sistemas de primer orden con retardo (FOPDT)

Los sistemas de primer orden con retardo son una descripción empírica de muchos sistemas dinámicos que constan de un retardo en el tiempo, en donde se mantienen en su punto de operación, para luego empezar a variar con una repuesta exponencial creciente o decreciente hasta que alcancen un nuevo valor en estado estable, comportamiento propio de los sistemas de primer orden.

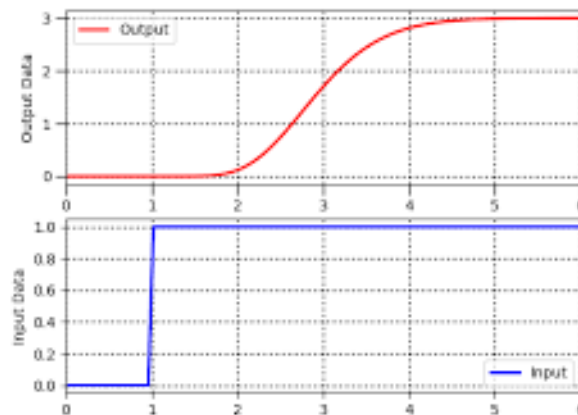


Figura 1.8 Respuesta de un sistema FOPDT (rojo) frente a una entrada escalón unitario (azul).

1.3.6 Sistema de control en lazo cerrado

Este tipo de sistema se utiliza en muchas industrias de manufactura para monitorear y afinar el proceso de producción. [6] Su principio de diseño se basa en la realimentación de la variable que se desea controlar, de forma que se convierta en una de las señales de entradas del sistema, formando un lazo cerrado; donde dicha variable tendrá efecto sobre la acción de control. El medio físico para llevar a cabo la realimentación generalmente son los transmisores, cuya señal será comparada con la señal de referencia, para finalmente aplicar el control a la señal de error. [7]



Figura 1.9 Sistema de control de lazo cerrado

1.3.7 Lazo de control en cascada

La técnica de control realimentado es la estrategia más simple de la automatización de procesos para compensar perturbaciones, pero este controlador solo reacciona una vez que el proceso ha sido perturbado,

esto significa que en todo el proceso se tuvo que propagar un error hasta que el controlador realice una acción correctiva. La estrategia de control en cascada permite anticiparse a las perturbaciones del sistema mediante el control del sistema en varios puntos del proceso debido a que combina dos o más controles realimentados. [6]

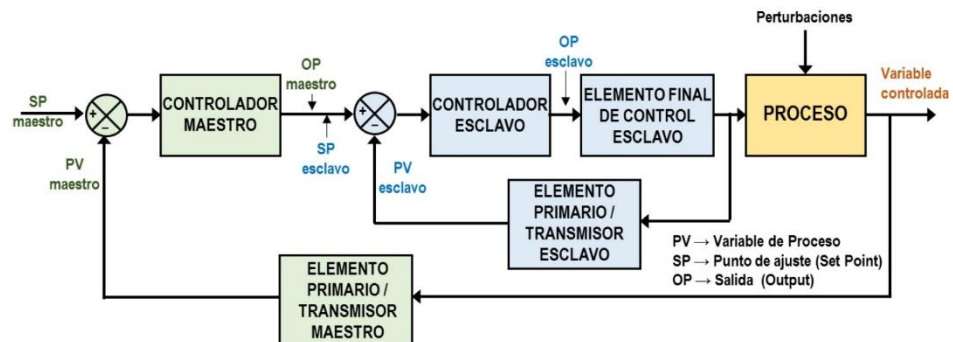


Figura 1.10 Diagrama de bloques de un Control en Cascada (multilazo)

1.3.8 Control por el Modelo Interno (IMC)

La técnica de control por el modelo interno, según García y Morari [8], se encuentra definida para sistemas con una sola entrada y salida (SISO) y asocia un procedimiento para el diseño de controladores donde la calidad del control y la robustez pueden ser influenciadas de manera directa. Esta técnica de control es muy empleada dentro del campo industrial, ya que permite evaluar la calidad del controlador a partir de cuatro criterios:

- **Comportamiento regulatorio:** La variable de salida debe mantenerse en su valor de consigna sin importar las perturbaciones que puedan afectar al sistema.
- **Comportamiento correctivo:** Los cambios en el valor de referencia o consigna deben ser alcanzados de forma rápida y de forma “suave”; es decir, sin que la variable controlada experimente oscilaciones o sobre niveles.
- **Robustez:** Se requiere de estabilidad y un desempeño de control aceptable frente a cambios paramétricos y estructurales que definan al modelo del proceso que se desea controlar.
- Habilidad para tratar con restricciones en las entradas del sistema.

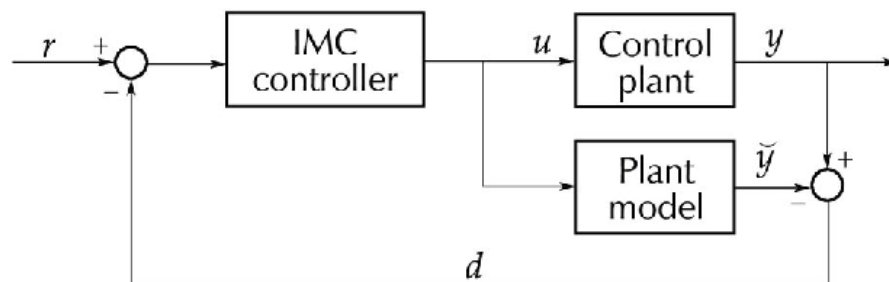


Figura 1.11 Diagrama de bloques planteado por García y Morari para la técnica de control por el modelo interno (IMC)

1.3.9 Control aplicado al proceso de destilación de aceites esenciales

El proceso industrial con el que se trabaja a lo largo de este proyecto no es ajeno al entorno de los sistemas de control; puesto que, según varias publicaciones científicas, siempre se ha tratado de encontrar la técnica más eficiente para controlar temperatura del vapor dentro de los reactores de destilación, siendo este uno de los parámetros más significativos con una gran influencia en la composición del aceite esencial. [9]

Controladores PID sintonizados con lógica Fuzzy [9], controladores PID con auto – tuning [10] y estudios en el diseño de controladores PID basados en la técnica IMC [11], son algunas de las técnicas de control que han sido empleadas para asegurar una efectiva regulación de la temperatura en los sistemas de destilación, considerando que esto no es una tarea fácil debido a los retrasos en el tiempo presentes en este tipo de sistemas y que normalmente son largos, además del sobrecalentamiento durante la operación, que podría causar una degradación en el aceite esencial producido. [10]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Identificación del modelo matemático del reactor de destilación

En la identificación del modelo matemático se diseñó un experimento basado en la excitación de la planta con diferentes condiciones iniciales para obtener curvas de temperatura en función del tiempo, éstas fueron utilizadas para estimar una función matemática.

El objetivo del experimento fue hallar las curvas de temperatura vs tiempo para una entrada elegida, entonces se identificó fuentes de variación en este proceso como el peso del material ingresado al reactor, la humedad de las hojas al momento de la destilación, la presión de entrada, la temperatura ambiental, el número de vueltas en la válvula de entrada de vapor y las dimensiones del reactor utilizado.

Cada uno de estos factores no controlados afectan el experimento a realizar por lo que se tomaron medidas para mantener un entorno de experimentación similar. En la Tabla 2.1 se aprecian los diferentes parámetros que definen la calidad del aceite extraído durante el proceso. Los grados brix hacen referencia a la concentración de azúcar en las hojas, valor obtenido mediante el uso de un refractómetro.

Numero de vueltas de la válvula de entrada	Peso del material	Grados brix	Altura del lecho	Presión	Temperatura ambiente
Variable manipulada	$\pm 5\text{kg}$	6.1	61cm	110 psi	32°C

Tabla 2.1 Valores de parámetros definidos para la realización de los experimentos en el reactor de destilación.

Las variables consideradas para la identificación fueron la temperatura interna del reactor dada por un indicador que se encontraba en la parte superior de éste, el número de vueltas de la válvula de entrada de vapor y el tiempo en segundos que tarda el equipo en estabilizar su temperatura.

El experimento consiste en manipular la válvula de entrada de vapor con un numero de vueltas determinado, luego de tomar los valores de temperatura y

tiempo transcurridos hasta que el sistema mantenga una temperatura constante, todo esto en un ambiente

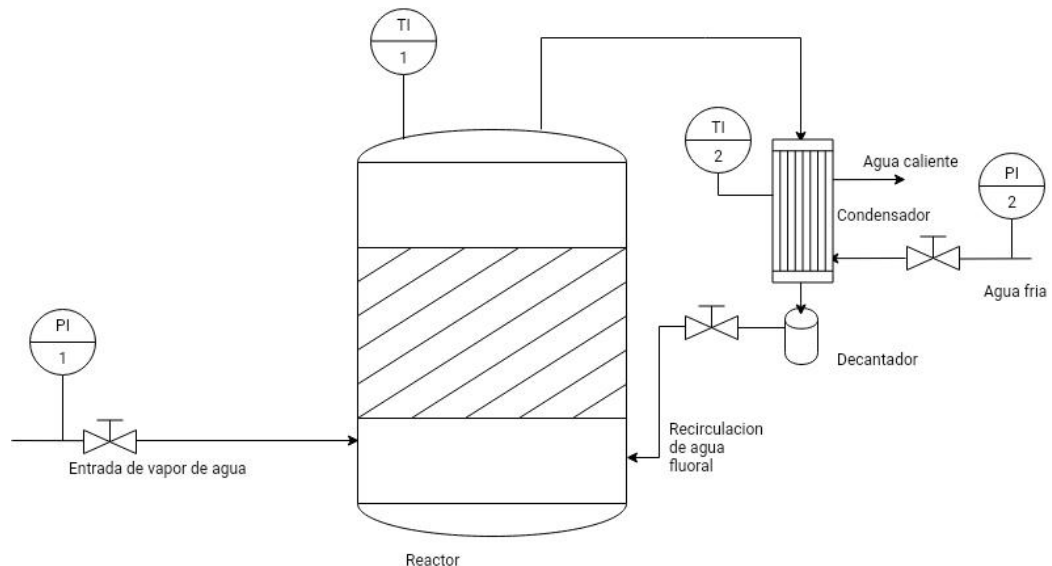


Figura 2.1 Diagrama P&ID del proceso para extracción de aceites esenciales por arrastre de vapor empleado para la identificación del sistema

El tamaño muestral del experimento se basó en rangos de operación normales del equipo en la fábrica, tomando información de los operadores se decidió que la muestra sea 6 experimentos para realizar comparaciones en diferentes números de vuelta de la válvula de control (ver Anexo 1).

Con los datos adquiridos se obtuvo una curva temperatura versus tiempo promedio que refleje el comportamiento del sistema, y que fueron usados en método de curva de reacción para obtener el modelo matemático del proceso.

2.2 Análisis de la estructura de control para regulación de temperatura en el reactor de destilación

Habiendo obtenido los datos de la planta mediante los experimentos ya mencionados, y según los puntos de operación que se han seleccionado para evaluar la dinámica de la temperatura en el interior del reactor de destilación, se tiene que la variable a manipularse es el caudal de vapor $Q(t)$ que ingresa al reactor y que este a su vez se relaciona de forma proporcional con un número de vueltas $n(t)$ que una electroválvula (una vez automatizado el

sistema) deberá girar para asegurar dicho flujo de caudal y alcanzar la temperatura deseada.

Hasta esta instancia, parecería que la solución al problema sería un simple lazo de control que incluya un controlador PID, pero al igual que se evalúa la estabilización del sistema conforme cambia la temperatura deseada, se considera a la presión $P(t)$ como variable de perturbación; dado que si esta variable física comienza a experimentar cambios, por más intentos que el controlador realice para establecer un caudal de vapor $Q(t)$ que asegure la consigna de temperatura, el error en estado estable será muy grande debido a que, ni en la sintonización del controlador, ni en la estructura de lazo de control como tal se consideró los efectos mencionados.

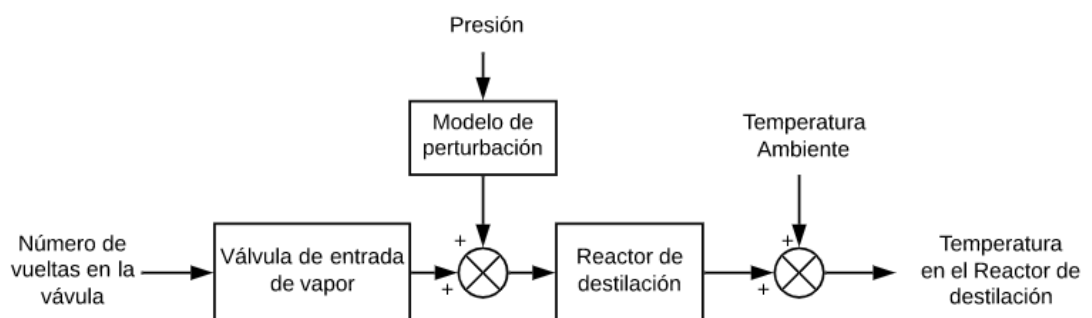


Figura 2.2 Diagrama de bloques del sistema actual operando en lazo abierto

Considerando el escenario planteado anteriormente se propone que, a más de la instrumentación debida para el control de la temperatura, la estructura del lazo de control y la sintonización del bloque PID en el controlador sea tomada en consideración de forma que el sistema sea capaz de rechazar las perturbaciones sin afectar de sobre manera a la variable controlada $T(t)$. De forma que la estructura de control que propone es en cascada o también conocida como multilazo (multiloop) con una sintonización de parámetros de los controladores bajo la técnica del control por el modelo interno (IMC).

2.3 Estructura del lazo de control en cascada

Con el razonamiento expuesto para la necesidad de una estructura del lazo de control en cascada, es vital definir la variable física de la que se deberá asegurar su rápida estabilización en el lazo interno; para luego habiendo

rechazado la perturbación asegurar la temperatura en el del reactor de destilación.

Analizando todos los efectos en conjunto: lazo interno y externo, se requiere como resultado final una temperatura no susceptible a cambios en la presión; es decir, cualquier cambio que se de en la presión y conociendo que esto influye en el comportamiento del caudal de vapor $Q(t)$, la variable física que se deberá controlar en el lazo interno será el número de vueltas $n(t)$ que la electroválvula deberá girar.

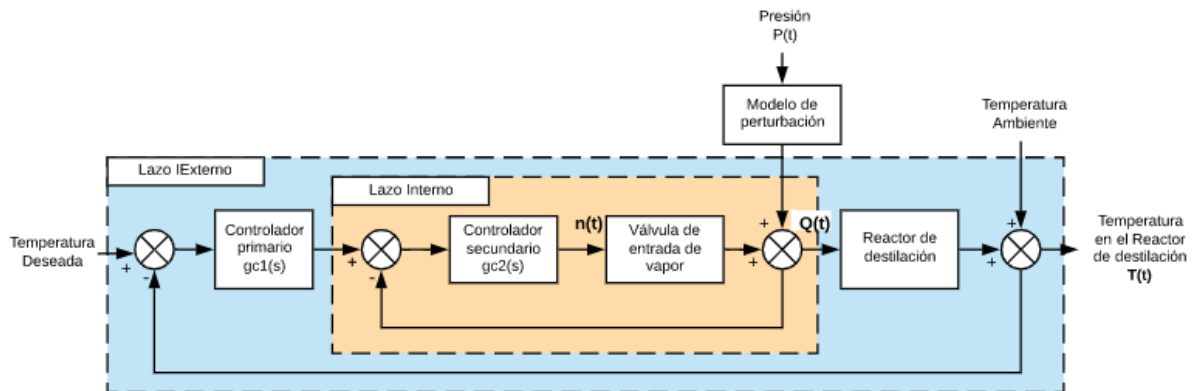


Figura 2.3 Esquema de control en cascada con la presión como variable de perturbación y número de vueltas como variable manipulada

En la figura 2.3 se puede apreciar que la variable de entrada para la válvula es el número de vueltas $n(t)$ y la salida $Q(t)$, todo esto en el lazo interno.

De igual manera, la entrada para el reactor de destilación es el caudal de vapor $Q(t)$ regulado en el lazo interno y su salida, la temperatura en el interior del reactor $T(t)$, siendo esta última la variable controlada.

Cabe notar que la consigna de caudal de vapor $Q(t)$ está dada por el controlador del lazo externo $g_{c1}(s)$ a partir del error en la temperatura $T(t)$; mientras que la consigna del número de vueltas en la electroválvula se encuentra dada por el controlador de lazo interno $g_{c2}(s)$ a partir del error en el caudal de vapor $Q(t)$.

2.4 Aplicación de técnica IMC para sintonización de parámetros de controladores PID del lazo de control

Habiendo seleccionado la estructura de control adecuada para contrarrestar la problemática de la susceptibilidad del sistema frente a las perturbaciones; se requiere de la sintonización de los controladores para asegurar el efecto deseado. La técnica IMC es la que se ajusta de mejor manera a los requerimientos en el desempeño del sistema puesto que según investigaciones realizadas [8], al sintonizarse los controladores con las constantes propias del sistema produce que la repuesta del sistema en lazo cerrado dependa la constante de un filtro, la que deberá fijarse según el desempeño deseado (ver Anexo 3).

2.5 Instrumentación de la planta según requerimientos del sistema

La instrumentación industrial para los requerimientos del sistema necesita cumplir con las especificaciones actuales del reactor que son las siguientes:

- Válvula de entrada de presión de accionamiento rápido
 - Soporta hasta 6000 psi
- Reactor
 - Capacidad máxima de 50kg
- Indicador de temperatura (2)
 - Rango de medición 0-120 C con sensibilidad de +- 2 C.
- Indicador de presión del vapor de agua
 - Rango de medición 0-160 psi con sensibilidad de +- 5 psi.
- Indicador de presión del agua fría
 - Rango de medición de 0-60 psi.
- Válvula de entrada de agua fría

Se propone la adquisición del siguiente equipo de instrumentación industrial que permita el control y monitoreo del estado de la planta:

- PLC
 - Controllogix L73

- 2 entradas analógicas
- Válvula de control de presión de entrada
 - Modelo MC-COSR-3
 - Rango de presión 0,01-1,6 MPaG
 - Rango de temperatura 0-220 C
 - Rango de control 4-20 mA
- Transductor de temperatura del reactor
 - Modelo PCE-EE23
 - Rango de temperatura -40 a 120 C con sensibilidad de $\pm 0,4$ C.
 - Rango de control 4-20 mA
- Indicador de temperatura del condensador
 - Rango de medición 0-120 C con sensibilidad de ± 2 C.
- Transductor de presión de entrada
 - Rango de medición 0-160 psi con sensibilidad de ± 5 psi.
 - Rango de control 4-20 mA
- Indicador de presión del agua fría del condensador
 - Rango de medición de 0-60 psi.

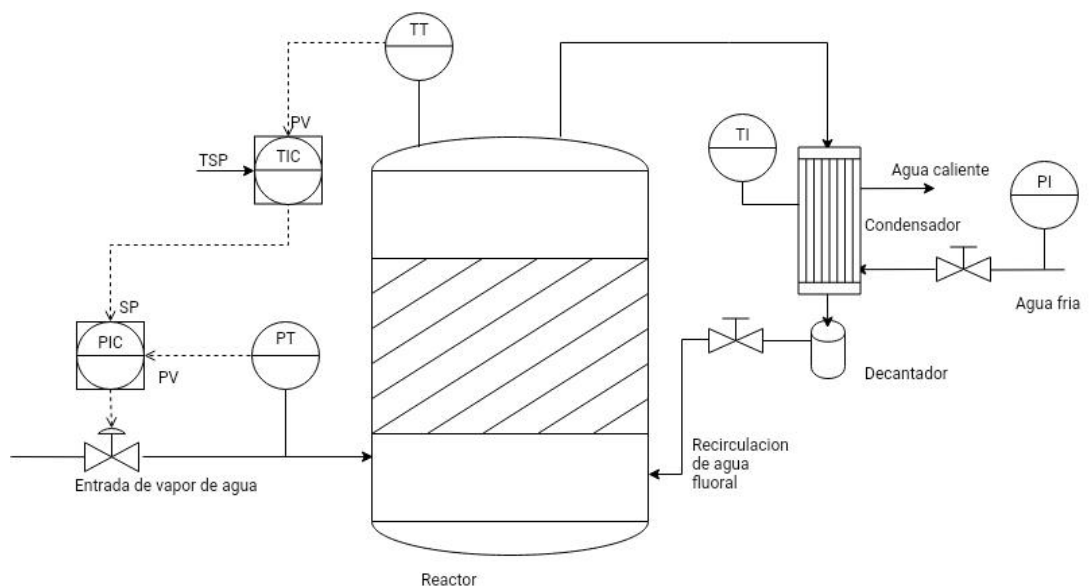


Figura 2.4 Diagrama P&ID incluyendo la estructura de control en cascada para la regulación de temperatura en el interior del reactor

2.6 Implementación del lazo de control en comunicación OPC entre Simulink y Studio 5000

Dado que no se cuenta con la planta del proceso de destilación para realizar las pruebas pertinentes, se denota la importancia de haber llevado a cabo la identificación de la dinámica del reactor y la válvula de entrada de vapor.

Para llevar a cabo la comprobación del correcto diseño de los controladores, se establece una conexión OPC entre los programas Simulink y Studio5000, mediante del servidor OPC KEPServerEX.

En el diagrama de bloques de Simulink se insertarán los bloques PID disponibles en el programa Studio5000, cuyos parámetros fueron sintonizados anteriormente mediante la técnica de control por modelo interno.

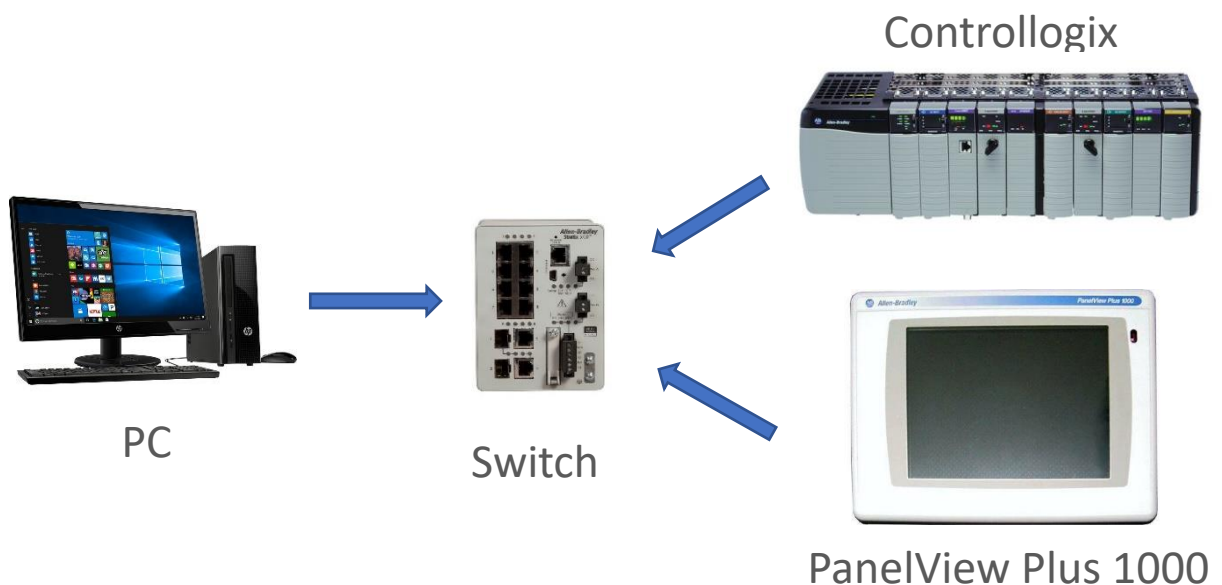


Figura 2.5 Simulación de proceso controlado para extracción de aceites esenciales, mediante comunicación OPC

El sistema de simulación de la planta consta de tres partes:

- Simulación del modelo matemático
- Conexión entre la simulación y el PLC
- La interfaz de control de la simulación

La simulación del modelo matemático se logró a través de funciones de transferencia como se puede ver en la figura 2.6, estas han sido adaptadas para poder trabajar en conjunto con el PLC. El bloque llamado OPC Config Real Time permite establecer una conexión en tiempo real para intercambiar las variables de la simulación, este bloque se utiliza junto con bloques de lectura y escritura para enviar la retroalimentación al PLC y recibir su señal de control.

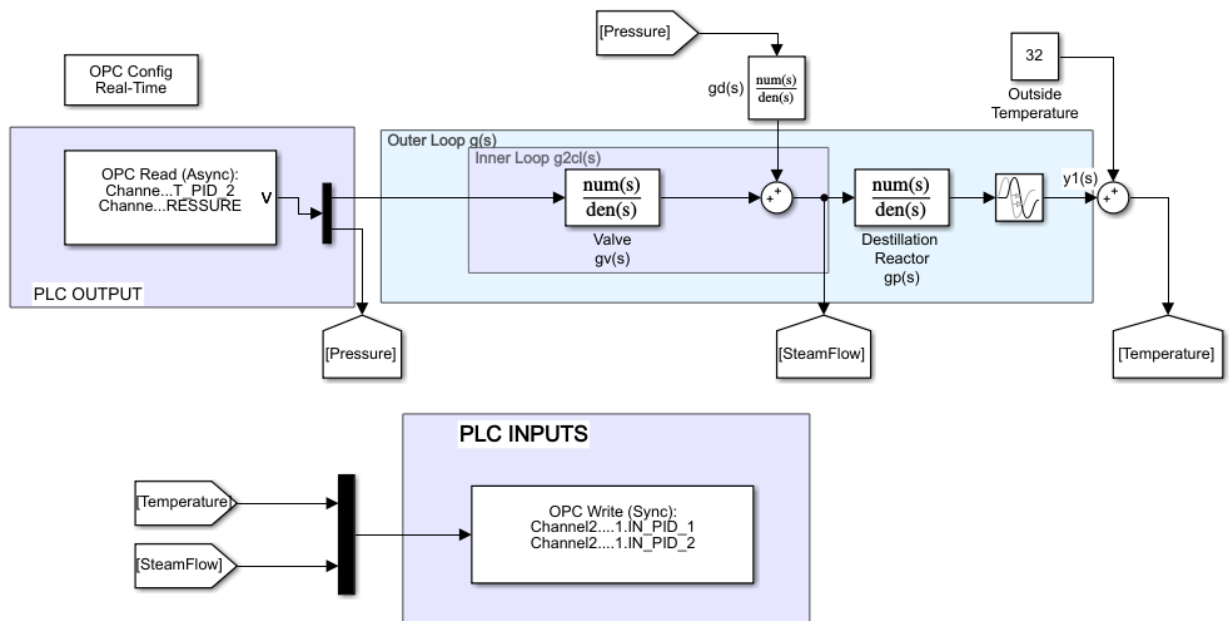


Figura 2.6 Sistema de simulación implementado en Simulink

En la figura 2.7, se puede apreciar cómo funciona la conexión entre estos entornos de trabajo.

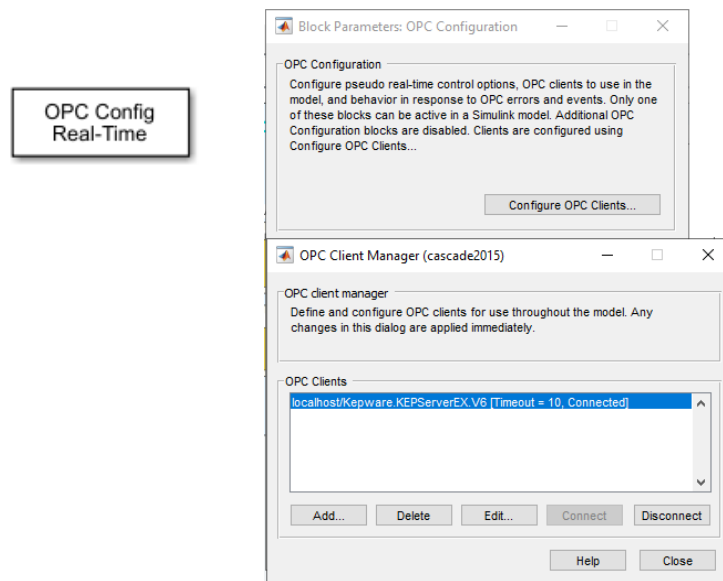


Figura 2.7 Conexión entre la simulación y el PLC

Tags	Modo de funcionamiento	Detalle
IN_PID_1	Entrada	Lectura del valor de temperatura actual del sistema
IN_PID_2	Entrada	Lectura del valor actual de flujo de vapor del sistema
PRESSURE	Entrada	El valor de perturbación de flujo de vapor que será aplicado a la planta
OUT_PID_2	Salida	El valor de salida otorgado por el controlador que ejerce la acción de control sobre la planta

Tabla 2.2 Detalle de las variables utilizadas en el controlador

Por último, tenemos la interfaz de usuario que se puede observar en la figura, esta nos permite monitorear las variables temperatura y flujo de vapor, también nos permite observar un esquemático del sistema.

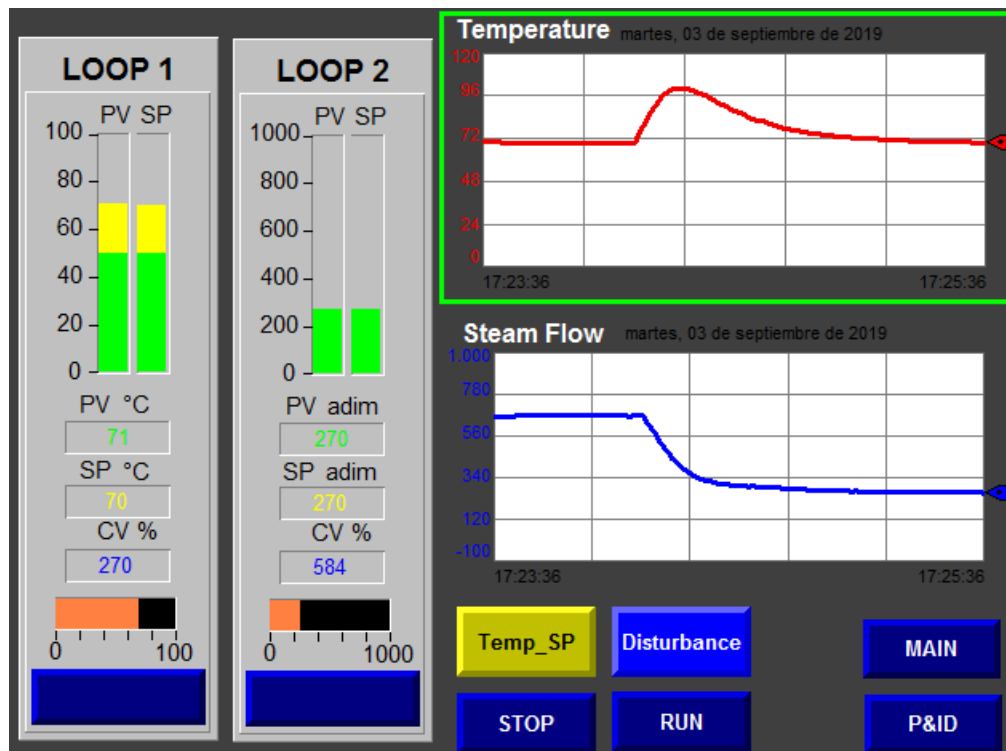


Figura 2.8 Visualización de las variables de control en el HMI

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se analizan y presentan los resultados obtenidos en el diseño del controlador para el control de temperatura del sistema de extracción de aceites. Estos resultados fueron obtenidos utilizando una simulación de la planta utilizando MATLAB, y mediante el uso de un PLC en el cual fue implementado el controlador propuesto en este proyecto.

3.1 Análisis de resultados en entorno de MatLab & Simulink

3.1.1 Identificación de la planta (estación de destilación)

Dentro del proceso para la identificación de la dinámica del reactor de destilación de la planta, se realizaron varios experimentos (Anexo 1) en donde se consideró a la temperatura en el interior del reactor de destilación $T(t)$ como variable controlada, y al flujo de vapor que entra $Q(t)$ como variable manipulada. Así mismo, se procuró comprobar que las variables físicas: presión, altura del lecho y grados brix se mantengan constantes, para evitar ruido en los datos a captar.

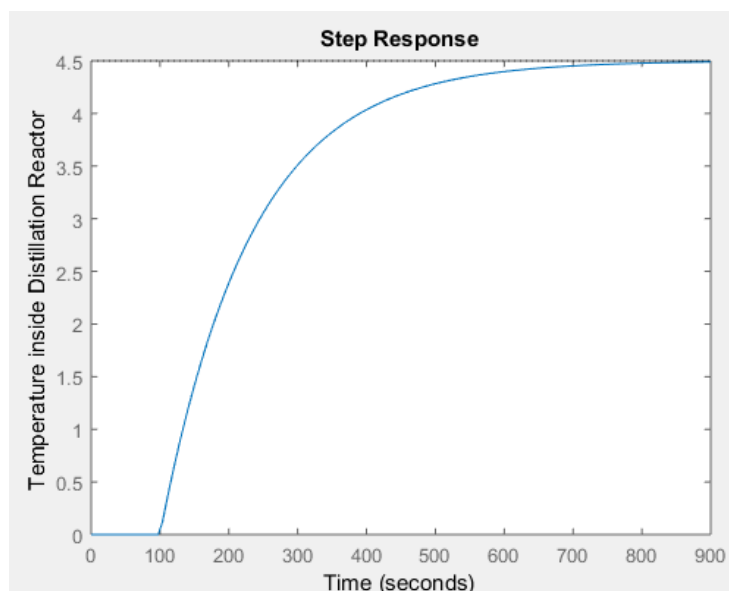


Figura 3.1 Respuesta a una entrada escalón unitario del modelo matemático del reactor de destilación obtenido mediante análisis de la curva de reacción

Basados en [12], el comportamiento es aproximado a un modelo de primer orden con retardo por sus siglas en inglés FOPDT, definido a partir de la ganancia de la

planta k_p , el tiempo de residencia τ_p y el tiempo de retardo τ_d , los cuales se indican a continuación como resultado de la identificación.

$$k_p = 4.5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\frac{\text{m}^3}{\text{seg}}}$$

$$\tau_p = 132 \text{ segundos} \approx 2.20 \text{ minutos}$$

$$\tau_d = 100 \text{ segundos} \approx 1.67 \text{ minutos}$$

Partiendo de la aproximación genérica, en donde se considera el tiempo de estabilización aproximadamente en $4\tau_p$, se tiene que el tiempo de estabilización debería ser 8.80 minutos hasta que se alcanza su estado estable, pero sin alcanzar el valor de la consigna.

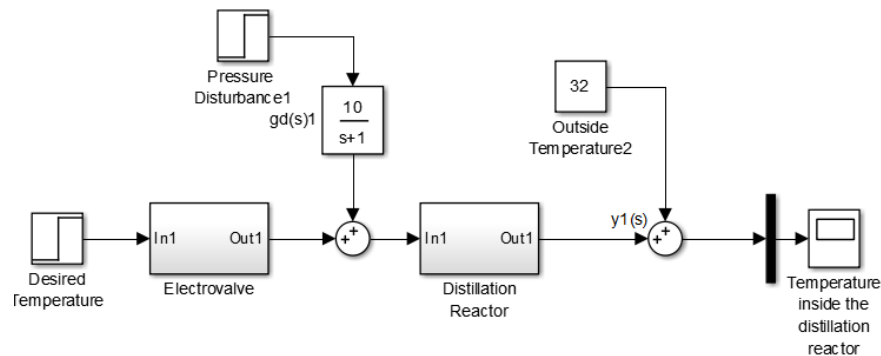


Figura 3.2 Diagrama de bloques del estado actual de la sección de destilación junto incluyendo la variable de perturbación

Nótese en la Figura 3.2; que el proceso, al no contar con la instrumentación y control adecuados, se encuentra operando en lazo abierto; de modo que el tracking del setpoint será completamente nulo; así como, la robustez del sistema frente a perturbaciones al carecer de un control adecuado causará que la temperatura se eleve o disminuya según se dé una pérdida o aumento de presión durante el proceso. Es decir, el sistema no es capaz de rechazar perturbaciones, siendo no pronosticadas debido a la histéresis que define la operación del caldero.

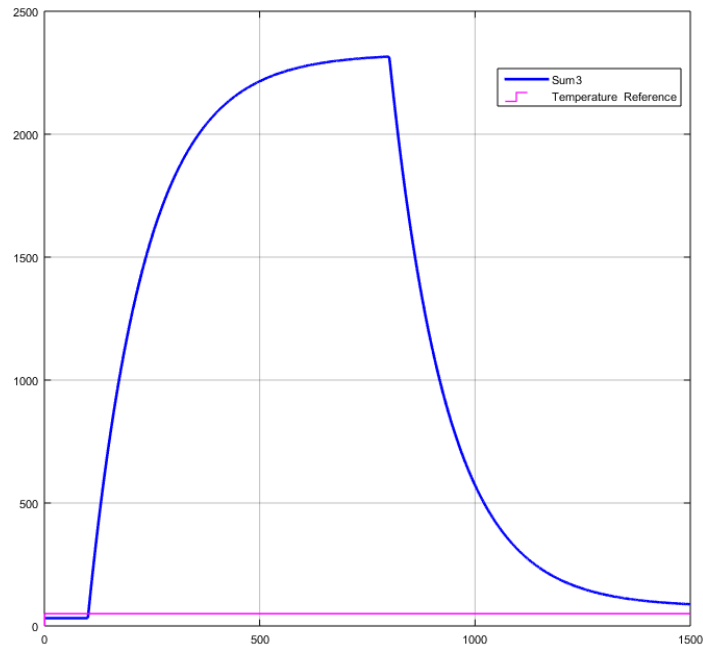


Figura 3.3 Respuesta del sistema en lazo abierto frente a entrada escalón con consigna de 50 [°C] y perturbación como caída de presión

3.1.2 Implementación de control en cascada en el entorno de SimuLink

Según lo analizado en la sección 2.3, el control se encuentra diseñado en cascada de forma que el sistema sea capaz de rechazar las perturbaciones en el menor tiempo posible, así también para cumplir con la consigna de temperatura que le sea impuesta para el interior del reactor de destilación. Asegurar estas dos condiciones es vital; dado que, las moléculas que se encuentran combinadas en el vapor una vez que este circula por el reactor son de carácter volátil, de forma un cambio continuo de temperatura y un sobrecalentamiento influyen de sobre manera en la calidad y rendimiento del aceite.

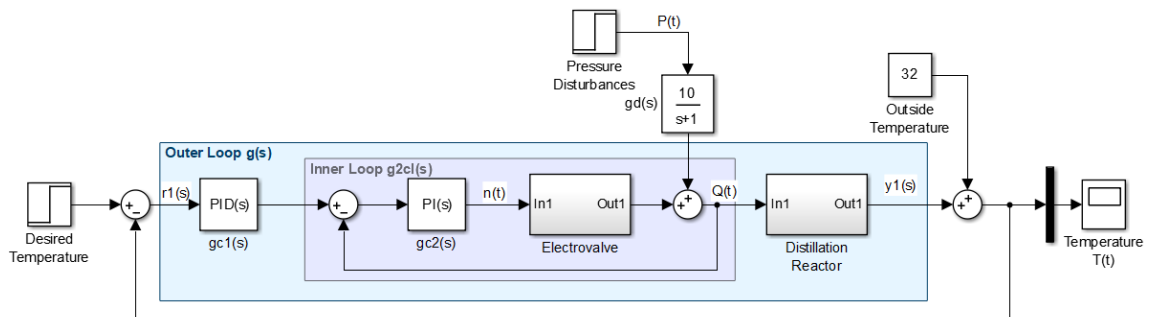


Figura 3.4 Lazo de control en cascada, considerando controlador interno y externo para la evaluación del tracking de la consigna y rechazo de perturbaciones

Tanto el controlador interno, como el externo se encuentran sintonizados empleando la técnica IMC como se indica en la sección 2.4 y Anexo A3. Mediante esta técnica se asegura que el rechazo a las perturbaciones sea efectivo haciendo que la válvula cambie de posición de tal forma que se mantenga en la referencia de temperatura sin presentar oscilaciones.

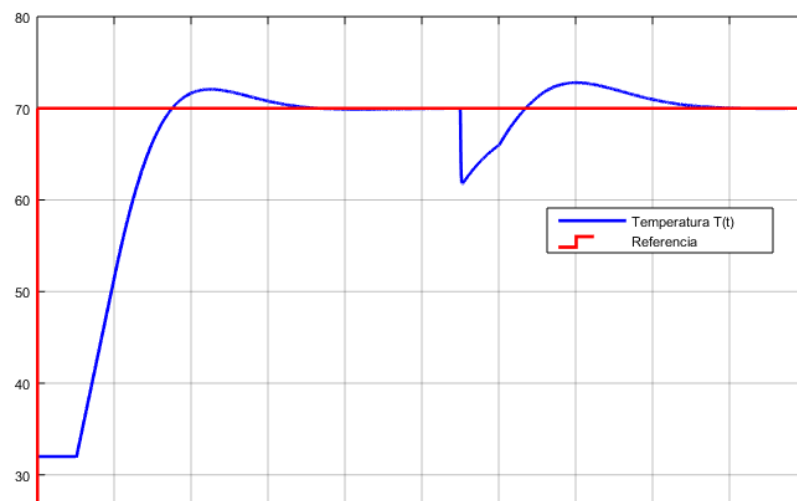


Figura 3.5 Respuesta de la aplicación del sistema de control en cascada evidenciando el tracking del setpoint y el rechazo a la perturbación.

3.1.3 HMI utilizando Factory Talk Machine Edition

En la figura 3.6 se puede apreciar la interfaz de control de la planta, esta fue realizada en Factory Talk View, permite monitorear las variables del controlador que está corriendo en el PLC. Estos se comunican mediante OPC con el PLC para cambiar los observar los parámetros del controlador. Las gráficas de temperatura y válvula de vapor se pueden observar en tiempo real, aunque pueden existir problemas si la latencia en la comunicación es elevada mostrando retrasos en las gráficas.

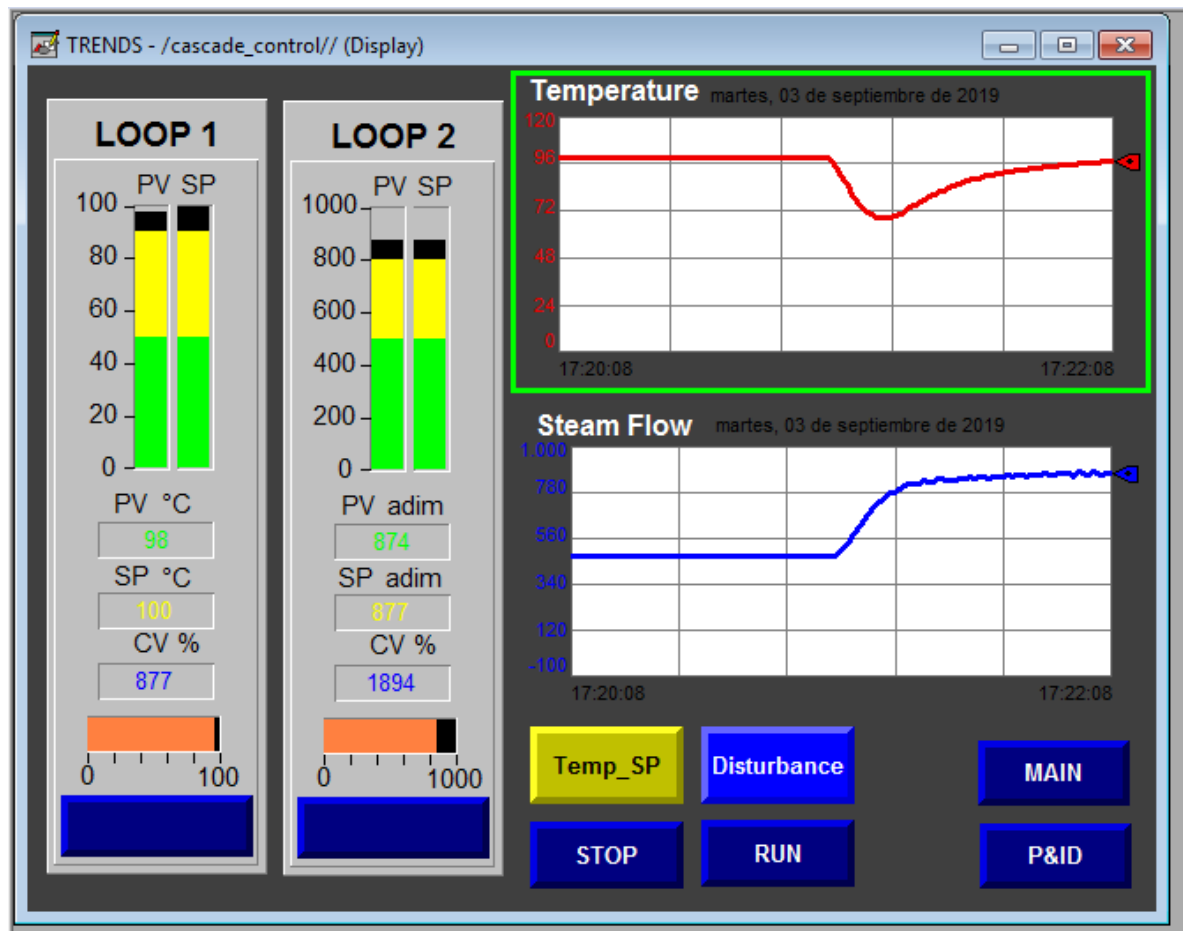


Figura 3.6 HMI monitoreando las variables del proceso

Esta pantalla permite realizar las siguientes actividades:

- Cambiar de pantallas para observar el diagrama P&ID del proceso de destilación de aceites y la temperatura dentro del reactor de destilación.
- Permite visualizar la temperatura en un indicador de aguja.
- Visualizar los valores de temperatura y flujo de vapor que ha tenido en tiempo real mientras se realizan varias pruebas, tanto en seguimiento de valor de consigna, como rechazo a las perturbaciones.
- Evaluar el esfuerzo de las variables manipuladas dentro del proceso.

3.1.4 Simulación de la planta interactuando con el controlador

En la figura 3.2 se observa la simulación en funcionamiento, se puede apreciar que durante el proceso las variables de temperatura y válvula de vapor muestran

sus cambios a través del tiempo. Además de que se permite modificar los valores de las variables de los controladores para lograr cambiar el funcionamiento del controlador.

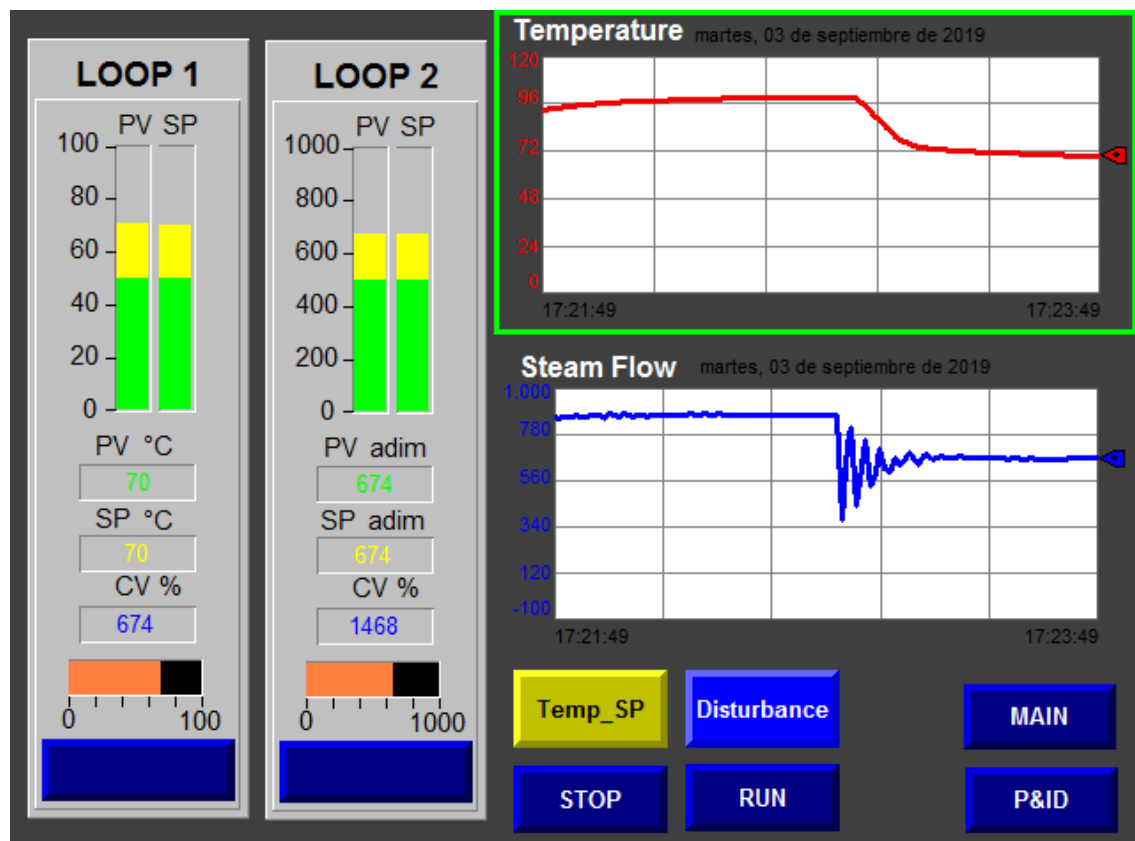


Figura 3.7 Cambio de setpoint desde la pantalla HMI

3.1.5 Comunicación entre la simulación y el controlador

La comunicación entre estos elementos del proyecto se realizó mediante un servidor OPC, en este caso se utilizó KEPServer. Debido a que se procesan los datos en tiempo real en la simulación, escoger tiempos apropiados de lectura de las variables (Scan rate) es clave. Por ello en las variables que se desea mostrar en la interfaz de control el Scan rate es de 10 milisegundos, esto nos permite mostrar los datos de manera continua a medida que se ejecuta la simulación. En la figura 3.8 podemos observar las variables utilizadas en el controlador.

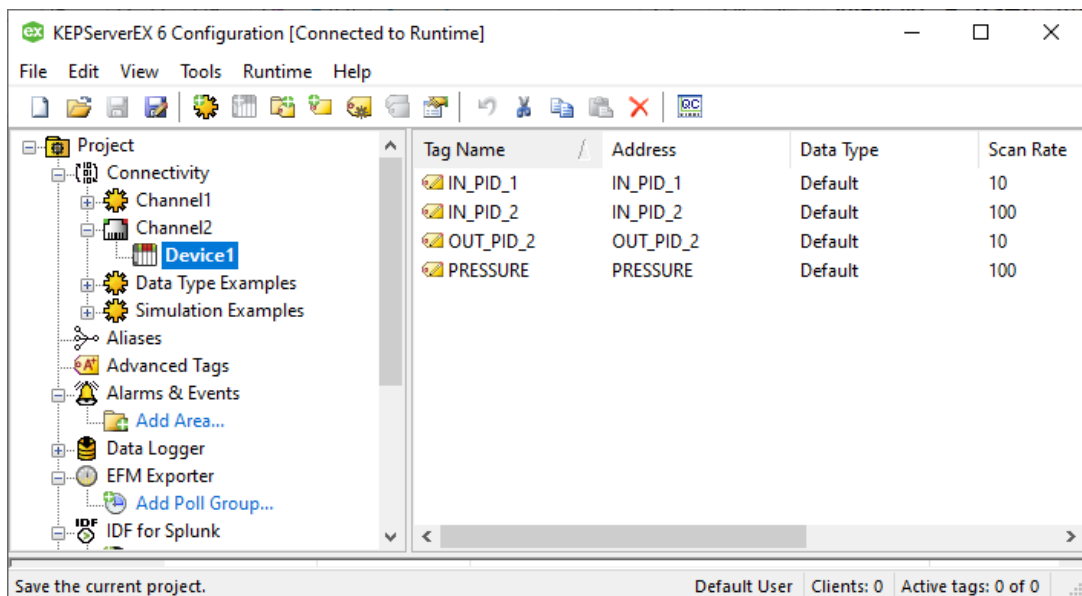


Figura 3.8 Variables utilizadas en la comunicación OPC

3.2 Hardware

3.2.1 Controlador implementado en el PLC

La implementación en el controlador fue exitosa debido a que el PLC seleccionado consta de un bloque de programación que puede ser adaptado para este caso. Este bloque llamado PID consta con rango de opciones que permite cambiar incluso el tiempo de muestreo del controlador.

PID		PID	
PID	pid2	PID	pid
Process Variable	IN_PID_2	Process Variable	IN_PID_1
Tieback	0	Tieback	0
Control Variable	OUT_PID_2	Control Variable	OUT_PID_1
PID Master Loop	0	PID Master Loop	0
Inhold Bit	0	Inhold Bit	0
Inhold Value	0	Inhold Value	0
Setpoint	473.5666	Setpoint	100.0
Process Variable	473.125	Process Variable	96.1875
Output %	10.564275	Output %	7.510357

Figura 3.9 Controladores implementados en el PID

3.3 Análisis de costos

Debido a que el sistema actual de extracción de aceite no consta de ningún equipo de automatización, convierte este diseño en algo costoso, pero debido a que los

equipos utilizados son de naturaleza modular, los que pueden ser reemplazados fácilmente en casos de fallas, se tiene como resultado un diseño que cumpla con los requerimientos del proceso bajo el esquema de control propuesto. El costo total de los equipos puede ser observado en la tabla 3.1 que se muestra a continuación.

Fabricante	Número de catálogo	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Siemens	6AV2132-0HA00-0AA1	Kit de iniciación LOGO! + KP300 Basic LOGO! 12/24RCE, HMI KP300 Basic mono PN, LOGO! Power 24V 1,3A, LOGO! SOFT Comfort V8, WinCC Basic	1	\$ 1,660.00	\$ 1,660.00
Siemens	6ED1055-1MD00-0BA2	Módulo ampliación LOGO! AM2 RTD, alimentación: DC 12/24V, 2 AI -50...+200 °C Pt100/1000 para LOGO! 8	1	\$ 149.99	\$ 149.99
Siemens	6ED1055-1MM00-0BA2	Módulo de ampliación LOGO! AM2 AQ, alimentación: DC 24V, 2 AO, 0-10V, 0/4-20 mA para LOGO! 8	1	\$129.99	\$129.99
TLV	MC-COSR-3	Válvula de control de presión de entrada	1	\$ 3,520.00	\$ 3,520.00
PCE	PCE-EE23	Transductor de temperatura del reactor	1	\$ 527.00	\$ 527.00
Omega	AVU	Transductor de presión de entrada	1	\$ 520.00	\$ 520.00
PCE	PCE-N24S	Indicador de temperatura del condensador	1	\$ 64.00	\$ 64.00
PCE	PCE-E10	Indicador de presión del agua fría del condensador	1	\$ 87.00	\$ 87.00
Trendnet	Ti-g50	Switch industrial de 5 puertos	1	\$219.99	\$ 219.99
Total					\$3,709.97

Tabla 3.1 Detalle de los costos totales

Cabe destacar que, la implementación de los lazos de control se realizó en un PLC con sus respectivos módulos de la marca Rockwell Automation, dado que eran de los que se disponían en el laboratorio de automatización; pero que, para los requisitos y parámetros del proceso, estos dispositivos se encuentran sobre dimensionados; motivo por el que se presente los elementos de la Tabla 3.1. Con los transductores y controlador seleccionados, se presenta a continuación una propuesta de red industrial que incluye los sensores que servirán de retroalimentación dentro del esquema de control propuesto para el proceso, en el cual resulta vital el rechazo a la perturbaciones debido a las caídas de presión.

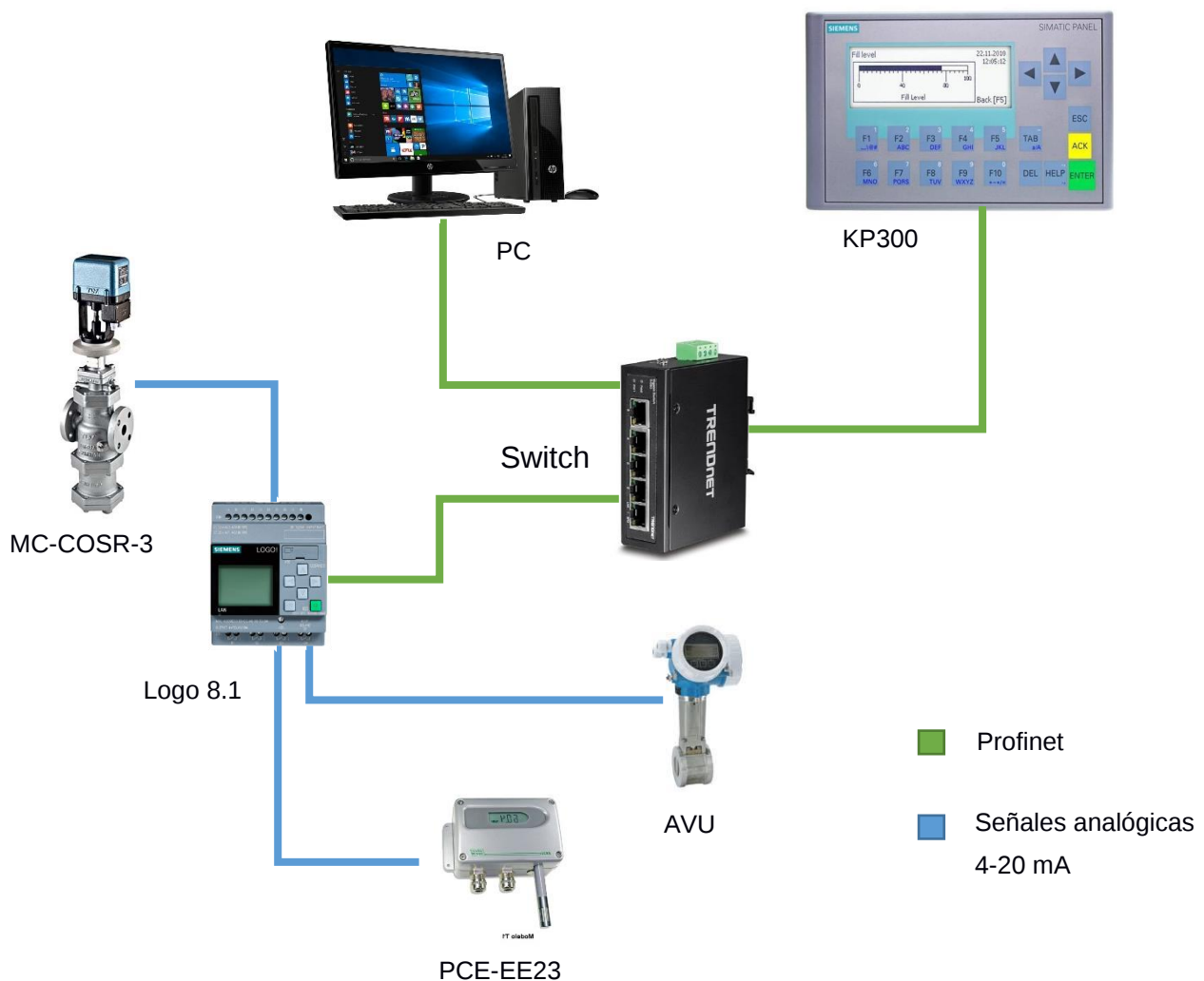


Figura 3.10 Propuesta de topología de red para el proceso de destilación de aceites

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La identificación del sistema, a partir del diseño de los diferentes experimentos en diferentes escenarios (Anexo A1), garantizó un porcentaje de ajuste del 92.5% en el modelo matemático permitiendo tener una representación fiel en cuanto al comportamiento de la temperatura dentro del reactor de destilación sin la necesidad de contar con herramientas de alto costo que realicen esta actividad. Para garantizar un resultado efectivo en cuanto al esquema de control propuesto para la extracción de aceites esenciales mediante arrastre de vapor, se implementaron los controladores internos y externos del lazo de control en un controlador lógico programable (PLC) con el fin de evidenciar el desempeño de la variable temperatura y flujo de vapor dentro del reactor, considerando como planta al modelo matemático previamente obtenido. Se realizaron varias pruebas una vez implementados los lazos de control dentro del PLC, concluyendo que tanto la latencia de la red, así como el período de muestreo del software Studio5000 y de SimuLink y la velocidad de comunicación entre ambos, influenciaban de sobre manera en el performance de los controladores previamente sintonizados con la técnica IMC según el Anexo A3; de modo que, tuvieron que los parámetros de estos tuvieron que ser modificados hasta que se cumpla con los requerimientos del proceso. Esta situación se verá atenuada al momento de ser implementada la red propuesta en la Figura 3.10, debido a los tiempos de respuesta muy lentos, propios de proceso termodinámicos y sin necesidad de comunicación OPC.

A pesar de que la planta presenta un comportamiento no lineal, en específico del reactor de destilación, cabe destacar que el rango de operación de este y que va ligado a las temperaturas al que el material vegetal debe ser expuesto para obtener su máximo rendimiento, permite ser aproximado a un sistema FOPDT. El controlador interno garantizó un efectivo rechazo de la perturbación cuando la

presión es disminuida, lo que implica que, frente a un apagón no programado del caldero, el proceso será capaz de recuperarse de forma rápida sin tener que exponer a la materia prima a cambios bruscos de presión y por ende de temperatura y al que ser componentes volátiles los productos que se desprenden del arrastre de vapor, causan la degradación de la calidad del aceite producido de forma más fácil y rápida.

El entorno de simulación en SimuLink sufre de ralentizaciones debido a la carga del proceso compartida con el sistema operativo, lo que resulta en tiempos en los que no existe respuesta de la planta afectando al controlador, debido a que recibe valores erróneos de la planta perjudicando la estabilidad del sistema. La implementación de un proceso que no sufra de estos problemas se puede realizar mediante la programación del modelo matemático en un lenguaje de bajo nivel como C permitiendo tener tiempo de respuestas más idóneos.

La utilización de un PLC para controlar un proceso de un sistema de control no es estrictamente necesario debido a que un controlador de este tipo está sobredimensionado para la tarea propuesta en este tema. En el mercado existen dispositivos dedicados a esta tarea por una fracción del costo mucho menor, lo que permite reducir el precio de la automatización de manera significativa.

La forma de implementarse el esquema de control propuesto para el proceso de destilación resulta no habitual y muy provechosa. De forma general, se acostumbra a disponer de la planta en físico y simular los efectos del controlador desde un computador, y que en este proyecto se ha trabajado en un entorno viceversa. En un mayor alcance, este entorno desarrollado es de gran importancia, ya que, dado las diferentes variables manipulables dentro del proceso citado, se cuenta con un banco de pruebas que antepone a los operarios, a los resultados que se obtendrán sin la necesidad de consumo de materia prima ni de energía para la realización de las pruebas.

Recomendaciones

Implementar un sistema de adquisición de datos en la planta de extracción de aceites permitiría obtener un mejor modelamiento de la planta. Esto lograría mejorar el modelo matemático del proceso permitiendo sintonizar el controlador para tener un mejor rendimiento.

Cambiar de estrategia en donde la planta es modelada resulta muy conveniente al desarrollar entornos de bancos de pruebas, pero debe siempre tener en cuenta de sobre manera las condiciones físicas que caracterizan al proceso. Dependiendo de esta consideración los resultados dentro del entorno simulado serán muy similares dentro del real observados en campo; de lo contrario, se estaría entrando en un ciclo de prueba – error, produciendo un desperdicio de tiempo y materia prima, lo que se traduce en pérdida de utilidad para la empresa.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. G. Hongratanaworakit, «Relaxing effect of ylang ylang oil on humans after transdermal absorption.,» *Phytother Res*, vol. 20, nº 9, pp. 758-763, 2006.
- [2] D.-J. Jung, J.-Y. Cha, S.-E. Kim, I.-G. J. Ko y Yong-Seok, «Effects of Ylang-Ylang aroma on blood pressure and heart rate in healthy men,» *J Exerc Rehabil*, vol. 9, nº 2, pp. 250-255, 2013.
- [3] L. T. H. Tan, L. H. Lee, W. F. Yin, C. K. Cha, H. A. Kadir, K. G. Chan y B. H. Goh, «Traditional Uses, Phytochemistry, and Bioactivities of *Cananga odorata* (Ylang-Ylang),» *Evid Based Complement Alternat Med*, 2015.
- [4] NeoAttack, «NeoAttack,» 5 January 2018. [En línea]. Available: <https://neoattack.com/neowiki/interfaz-grafica-de-usuario/>.
- [5] L. L. -. Linköping, System Identification: Theory for the User, Second Edition, Sweden: Prentice Hall, 1998.
- [6] C. A. Smith, Automated Continuous Process Control, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [7] D. T. -. I. ". V. d. G. -. É. -. S. -. E. España, «MAKINANDO,» [En línea]. Available: <https://makinandovelez.wordpress.com/2018/02/15/sistemas-de-control-de-lazo-cerrado/>.
- [8] C. E. Garcia y M. Morari, «Internal Model Control. A Unifying Review and Some New Results,» 1982.
- [9] N. Kasuan, Z. Yusuf, M. Nasir Taib, M. H. Fazalul Rahiman, N. Tajuddin y M. A. Abdul Aziz, «Robust Steam Temperature Regulation for Distillation of Essential Oil Extraction Process using Hybrid Fuzzy - PD plus PID Controller,» *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2010.
- [10] N. Tajjudin, Z. Yusuf, M. Fazalul Rahiman y M. Nasir Taib, «Self tuning PID Controller for Steam Distillation Essential Oil Extraction System,» *International Colloquim on Signal Porcessing & Its Applications (CSPA)*, 2010.

- [11] M. Tajjudin, M. A. Abdullah Pani, S. Abdul Aziz, N. Ishak y R. Adnan, «A Study on IMC - based PID for Steam Distillation Process,» *IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, 20 October 2018.
- [12] Bequette y W. B., de *Process control: modeling, design and simulation*, Prentice Hall.

ANEXOS

ANEXO A1

Datos del experimento 1

Numero de vueltas de la valvula de entrada	Peso del material	Grados brix	Olla #	Altura	Presión
3	20.5 kg	6.1	6	61cm	110 psi

Tabla 4.1 Valores de parámetros para el experimento 1

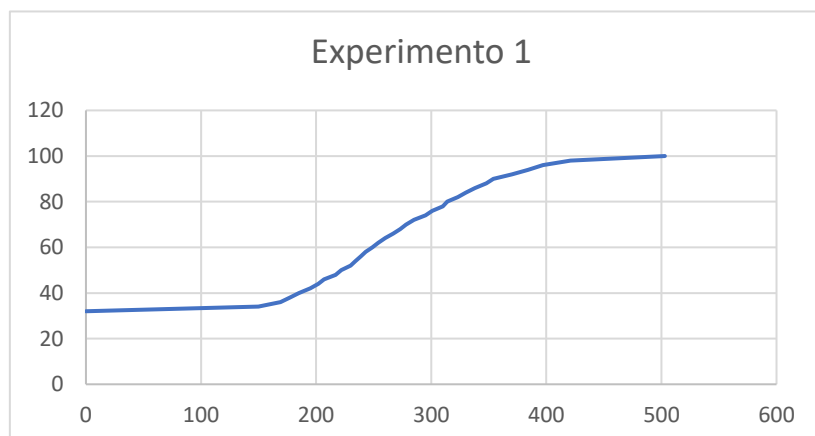


Figura 4.1 Comportamiento de la temperatura en el experimento 1

Datos del experimento 2

Numero de vueltas de la valvula de entrada	Peso del material	Grados brix	Olla #	Altura	Presión
1	33 kg	7.2	6	61cm	110 psi

Tabla 4.2 Valores de parámetros para el experimento 2

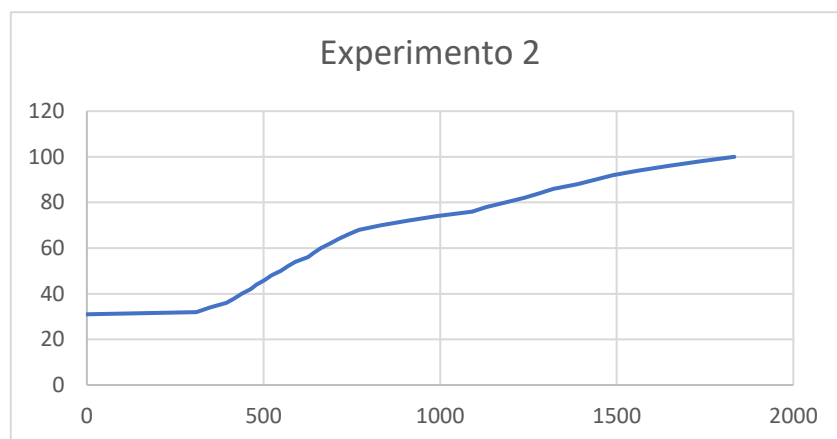


Figura 4.2 Comportamiento de la temperatura en el experimento 2

Datos del experimento 3

Numero de vueltas de la valvula de entrada	Peso del material	Grados brix	Olla #	Altura	Presión
2	34 kg	6.11	6	61cm	110 psi

Tabla 4.3 Valores de parámetros para el experimento 3

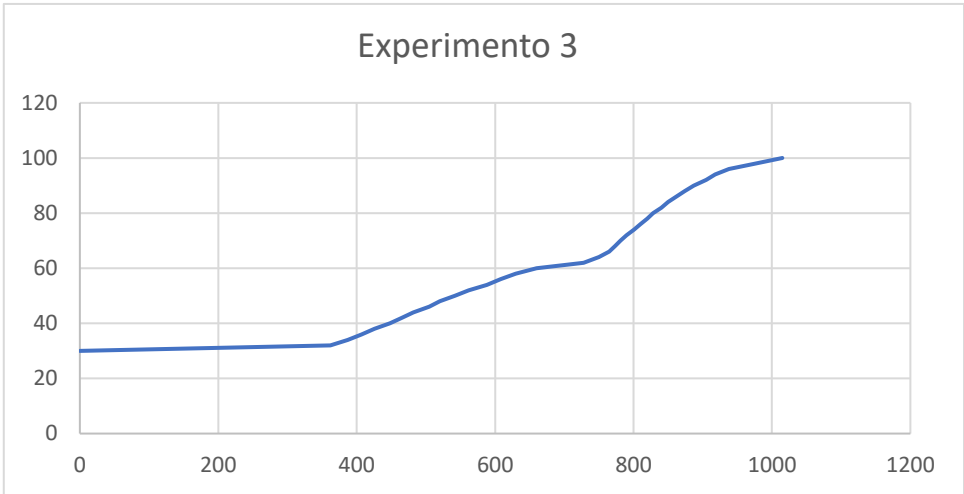


Figura 4.3 Comportamiento de la temperatura en el experimento 3

Datos del experimento 4

Numero de vueltas de la valvula de entrada	Peso del material	Grados brix	Olla #	Altura	Presión
3	34 kg	1.7	6	61cm	110 psi

Tabla 4.4 Valores de parámetros para el experimento 4

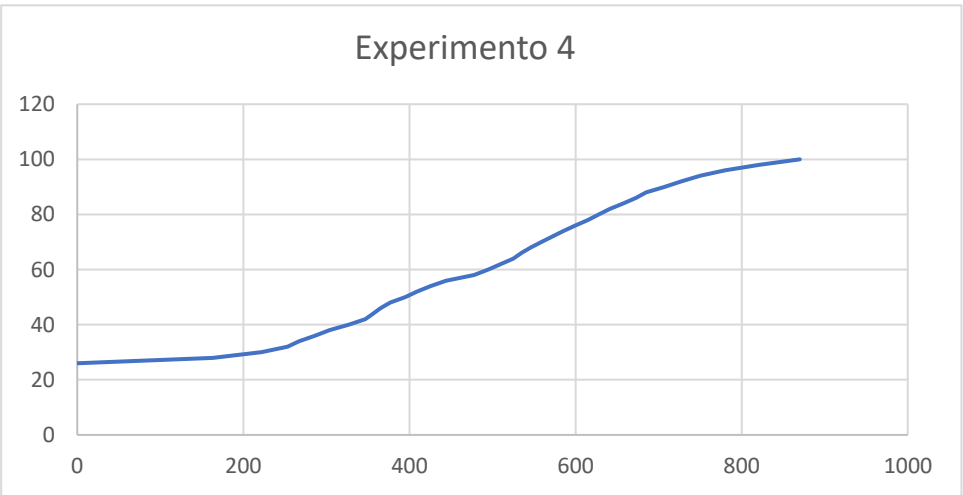


Figura 4.4 Comportamiento de la temperatura en el experimento 4

Datos del experimento 5

Numero de vueltas de la valvula de entrada	Peso del material	Grados brix	Olla #	Altura	Presión
3	34 kg	1.7	6	61cm	110 psi

Tabla 4.5 Valores de parámetros para el experimento 5

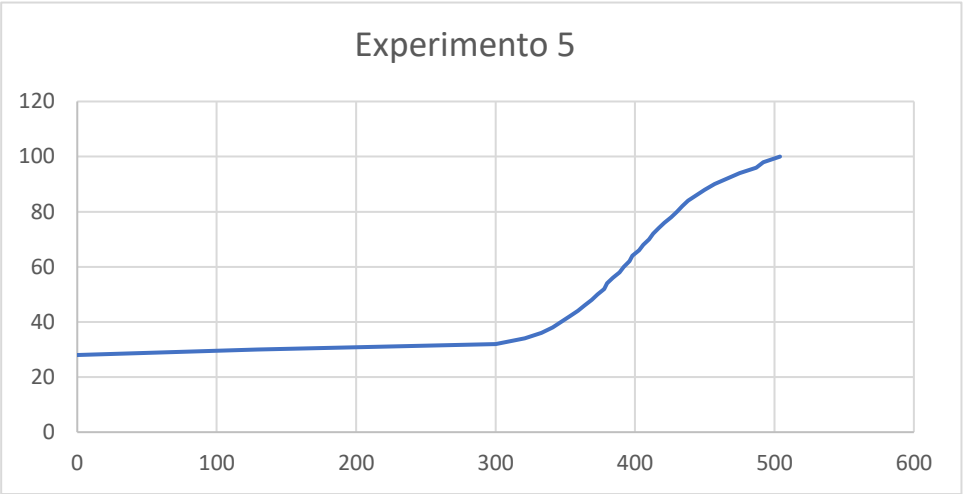


Figura 4.5 Comportamiento de la temperatura en el experimento 5

Datos del experimento 6

Numero de vueltas de la valvula de entrada	Peso del material	Grados brix	Olla #	Altura	Presión
3	30 kg	5.7	6	64 cm	110 psi

Tabla 4.6 Valores de parámetros para el experimento 6

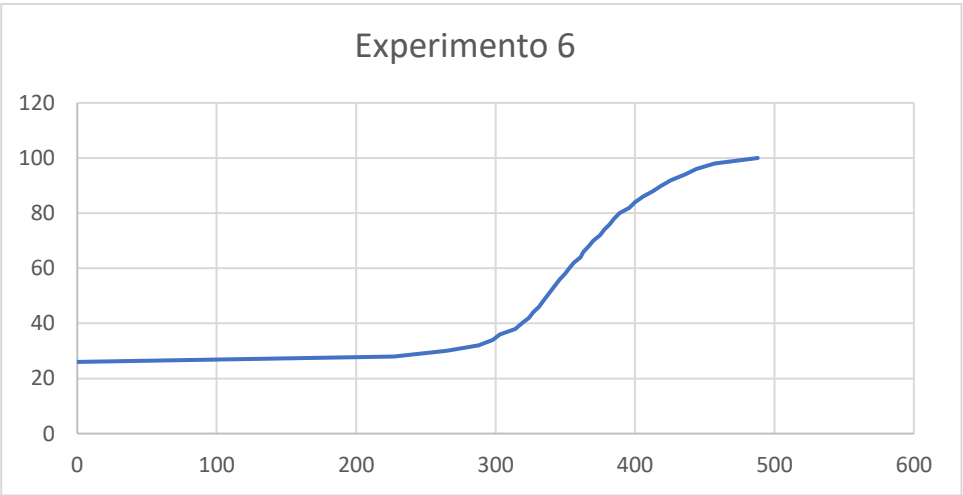


Figura 4.6 Comportamiento de la temperatura en el experimento 6

ANEXO A2

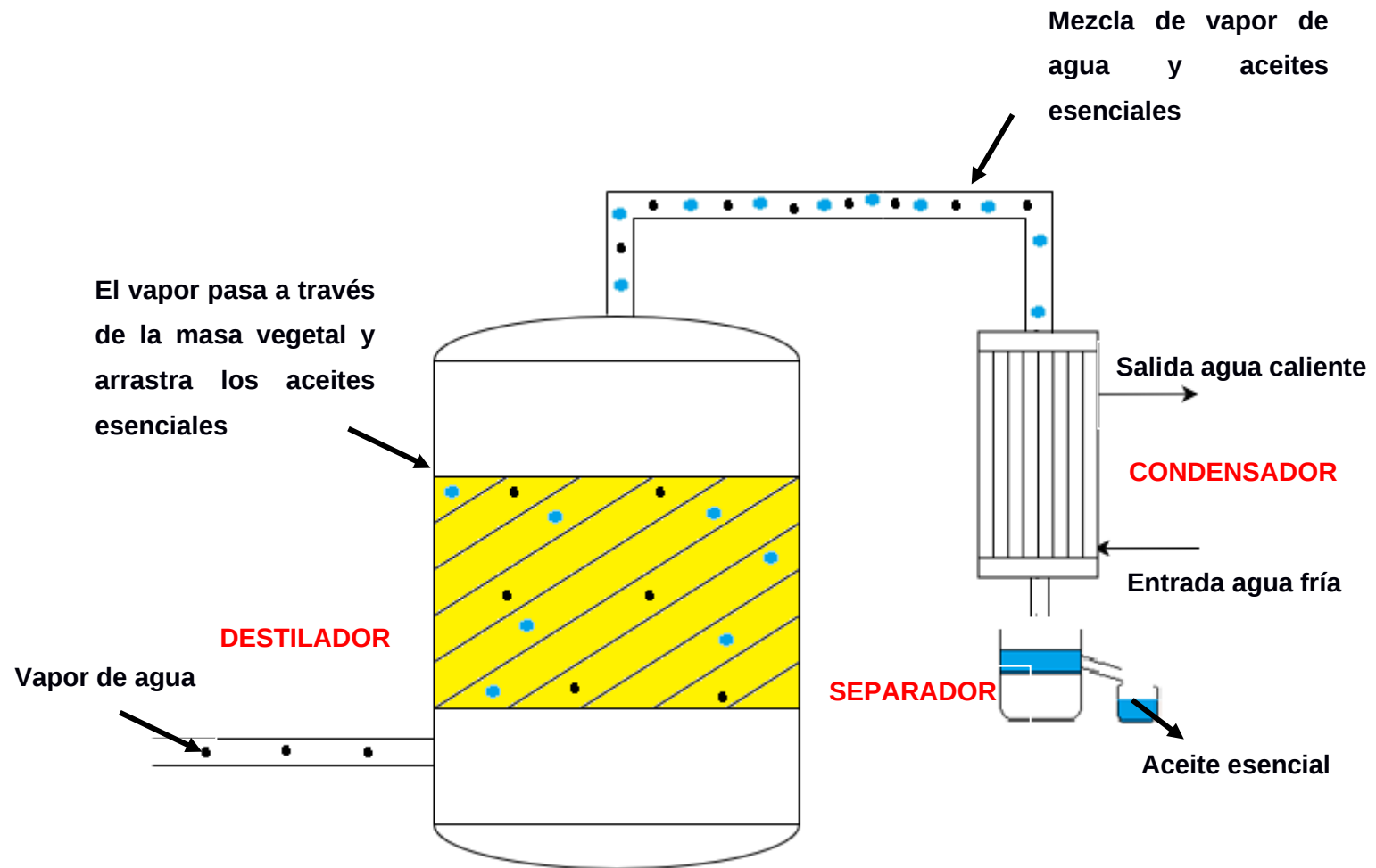


Figura 4.7 Proceso de extracción de aceites esenciales mediante el método de destilación por arrastre de vapor

ANEXO A3

Sintonización de parámetros de controlador interno y externo del lazo de control propuesto para el proceso de destilación de aceites esenciales, empleando la técnica de Control por Modelo Interno (IMC)

1. Controlador PI basado en IMC (Lazo Interno)

$$g_v(s) = \tilde{g}_v(s)$$

$$\tilde{g}_v(s) = \tilde{g}_{v+}(s) \cdot \tilde{g}_{v-}(s) = 1 \cdot \frac{k_{p_v}}{\tau_{p_v}s + 1}$$

$$\tilde{q}_2(s) = \tilde{g}_{v-}^{-1}(s) = \frac{\tau_{p_v}s + 1}{k_{p_v}}$$

$$q_2(s) = \tilde{q}_2(s) \cdot f_v(s) = \frac{\tau_{p_v}s + 1}{k_{p_v}} \cdot \frac{1}{\lambda_v s + 1}$$

$$g_{c2}(s) = \frac{q_2(s)}{1 - q_2(s)\tilde{g}_v(s)}$$

$$= \frac{\tilde{q}_2(s)f_v(s)}{1 - \tilde{q}_2(s)f_v(s)\tilde{g}_{v+}(s)\tilde{g}_{v-}(s)}$$

$$= \frac{\tilde{g}_{v-}^{-1}(s)f_v(s)}{1 - \tilde{g}_{v-}^{-1}(s)f_v(s)\tilde{g}_{v+}(s)\tilde{g}_{v-}(s)}$$

$$= \frac{\tilde{g}_{v-}^{-1}(s)f_v(s)}{1 - f_v(s)}$$

$$= \frac{\left(\frac{\tau_{p_v}s + 1}{k_{p_v}}\right)\left(\frac{1}{\lambda_v s + 1}\right)}{1 - \frac{1}{\lambda_v s + 1}}$$

$$= \frac{\tau_{p_v} s + 1}{k_{p_v} \lambda_v s}$$

$$g_{c2}(s) = \frac{\tau_{p_v}}{k_{p_v} \lambda_v} \left(1 + \frac{1}{\tau_{p_v} s} \right) \quad g_{PI}(s) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$$

$$k_c = \frac{\tau_{p_v}}{k_{p_v} \lambda_v}$$

$$\tau_i = \tau_{p_v}$$

$$g_{2cl}(s) = \frac{g_{c2}(s) g_v(s)}{1 + g_{c2}(s) g_v(s)}$$

$$= \frac{\left(\frac{\tau_{p_v} s + 1}{k_{p_v} \lambda_v s} \right) \left(\frac{k_{p_v}}{\tau_{p_v} s + 1} \right)}{1 + \left(\frac{\tau_{p_v} s + 1}{k_{p_v} \lambda_v s} \right) \left(\frac{k_{p_v}}{\tau_{p_v} s + 1} \right)}$$

$$= \frac{\frac{1}{\lambda_v s}}{1 + \frac{1}{\lambda_v s}}$$

$$g_{2cl}(s) = \frac{1}{\lambda_v s + 1}$$

2. Controlador PID basado en síntesis directa (Lazo Externo)

$$e^{-\theta s} = \frac{1}{e^{\theta s}} \approx \frac{1}{1 + \theta s}$$

$$g(s) = g_{2cl}(s) \cdot g_p(s) = \frac{k_p}{(\lambda_v s + 1)(\tau_p s + 1)} \cdot e^{-\theta s}$$

$$\left(\frac{y_1}{r_1}\right)_{deseada} = \frac{g_{c1}(s)g(s)}{1 + g_{c1}(s)g(s)} = \frac{1}{\tau_c s + 1} \cdot e^{-\theta s}$$

$$\left(\frac{y_1}{r_1}\right)_{deseada} = \frac{1}{\tau_c s + 1} \cdot e^{-\theta s}$$

$$g_{c1}(s) = \left[\frac{1}{g(s)} \right] \cdot \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{y_1}{r_1}\right)_{deseada}} - 1}$$

$$g_{c1}(s) = \left[\frac{(\lambda_v s + 1)(\tau_p s + 1)}{k_p \cdot e^{-\theta s}} \right] \cdot \frac{1}{\left[\left(\frac{\tau_c s + 1}{e^{-\theta s}} \right) - 1 \right]}$$

$$= \left[\frac{(\lambda_v s + 1)(\tau_p s + 1)}{k_p \cdot e^{-\theta s}} \right] \left[\frac{e^{-\theta s}}{\tau_c s + 1 - e^{-\theta s}} \right]$$

$$= \frac{(\lambda_v s + 1)(\tau_p s + 1)}{k_p(\tau_c + \theta)s}$$

$$= \frac{\lambda_v \tau_p s^2 + (\lambda_v + \tau_p)s + 1}{k_p(\tau_c + \theta)s}$$

$$g_{c1}(s) = \frac{\lambda_v + \tau_p}{k_p(\tau_c + \theta)} \left[1 + \frac{1}{(\lambda_v + \tau_p)} \frac{1}{s} + \frac{\lambda_v \tau_p}{(\lambda_v + \tau_p)} s \right]$$

$k_c = \frac{\lambda_v + \tau_p}{k_p(\tau_c + \theta)}$	$\tau_i = \lambda_v + \tau_p$	$\tau_d = \frac{\lambda_v \tau_p}{(\lambda_v + \tau_p)}$
---	-------------------------------	--