

DISEÑO DE UNA UNIDAD DE MEZCLADO Y DESTILACIÓN BINARIA  
ATMOSFÉRICA PARA ETANOL-AGUA

FRANCISCO CALA CALDERÓN

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2019

DISEÑO DE UNA UNIDAD DE MEZCLADO Y DESTILACIÓN BINARIA  
ATMOSFÉRICA PARA ETANOL-AGUA

FRANCISCO CALA CALDERÓN

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Electrónica

DIRECTOR DE LA TESIS  
CARLOS GERARDO HERNÁNDEZ CAPACHO, M.Sc.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2019

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bucaramanga, 10 de junio de 2019

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mis padres Raquel Calderón y José Cala, a mi esposa Silvia Calina Pinilla e hijos María Alejandra, Juan Diego y Jose David quienes son mi fuerza y apoyo para cada día ser mejor y alcanzar mis metas.*

## AGRADECIMIENTOS

### **A Dios.**

*Por haberme permitido alcanzar esta meta y el logro de mis objetivos, además de su infinita bondad y sabiduría.*

### **A mis padres.**

*Por el apoyo en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien,*

### **A mi esposa e hijos**

*Por su apoyo incondicional en todo momento. Por su amor, comprensión y esfuerzo constante para alcanzar el éxito y el logro de las metas; unidos y en familia.*

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
OBJETIVOS .....	16
OBJETIVO GENERAL .....	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.  MARCO TEÓRICO .....	17
1.1 ESTADO DEL ARTE .....	18
1.2 CONCEPTOS BÁSICOS.....	19
2.  METODOLOGÍA .....	21
2.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....	22
2.2 SIMULACIÓN BASADA EN MODELOS DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN. .....	24
2.3 DISEÑO UNIDAD DE MEZCLADO Y DESTILACIÓN BINARIA ATMOSFÉRICA PARA AGUA Y ETANOL. ....	34
2.4 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA .....	36
2.4.1 Zona de calentamiento o ebullición .....	37
2.4.2 Zona destilación y reflujo.....	40
2.4.3 Zona de condensación .....	42
2.4.4 Zona de recolección y producto .....	44
2.4.5 Zona de almacenamiento y carga .....	46
2.4.6 Selección instrumentación, actuadores y sistema de control. ....	48
2.4.7 Sistema de control.....	48
2.5 INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN .....	51
2.6 ENSAMBLE DE LA UNIDAD DE DESTILACION Y MEZCLADO .....	54
2.6.1 Ensamble de la estructura mecánica .....	54
2.6.2 Conexión eléctrica.....	55
2.6.3 Operación básica de los sensores y actuadores .....	58
2.7 DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE OPERACIÓN .....	61
3.  RESULTADO DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y OPERACIÓN DE LA UNIDAD DE MEZCLADO Y DESTILACIÓN.....	63
4.  CONCLUSIONES.....	68
5.  RECOMENDACIONES .....	69
BIBLIOGRAFÍA .....	70
ANEXOS .....	72

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Constantes ecuación entalpia liquido etanol-agua .....	28
Tabla 2. Constantes ecuación entalpia vapor etanol-agua.....	28
Tabla 3. Constantes Antoine.....	29
Tabla 4. Hardware seleccionado.....	49
Tabla 5. Señales I/Os.....	51
Tabla 6. Instrumentación de la planta .....	53
Tabla 7. Inspección de la unidad destilación UPB.....	64
Tabla 8. Pruebas de circuitos e instrumentación.....	65
Tabla 9. Pruebas lógicas y HMI.....	67

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama columna destilación .....	13
Figura 2. Diagrama Unidad Mezclado .....	14
Figura 3. Proceso de destilación .....	22
Figura 4. Flujos dentro de una columna .....	23
Figura 5. Columna destilación Batch.....	24
Figura 6. Dimensiones entre platos columna destilación .....	29
Figura 7. Arreglo platos columna destilación.....	30
Figura 8. Respuesta modelo con duty 240, 280 y 192 KJ/min .....	31
Figura 9. Datos simulación Matlab 90 minutos de prueba.....	33
Figura 10. Diseño planta destilación.....	37
Figura 11. Vistas lateral y superior boiler .....	38
Figura 12. Zona de calentamiento dimensiones.....	38
Figura 13. Vista sistema de aislamiento y resistencia .....	39
Figura 14. Secciones del diseño unidad de calentamiento .....	39
Figura 15. Vista lateral torre destilación .....	40
Figura 16. Arreglo de platos .....	41
Figura 17. Platos perforado.....	41
Figura 18. Secciones del diseño arreglo de platos.....	42
Figura 19. Vista isométrica de serpentín condensador .....	43
Figura 20. Vista superior y lateral del serpentín .....	44
Figura 21. Tanque isométrico de interface y producto .....	45
Figura 22. Tanque interface y producto.....	46
Figura 23. Tanque de carga .....	47
Figura 24. Zona de carga .....	47
Figura 25. Diagrama de bloques de sistema de control .....	50
Figura 26. Estructura y montaje de la planta.....	54
Figura 27. Sistema de acoplamiento rápido .....	55
Figura 28. Diseño de panel eléctrico de control Gabinete.....	56
Figura 29. Gabinete de potencia y conexionado .....	56
Figura 30. Gabinete paro emergencia y selectores manual/automático.....	57

Figura 31. Programa PID .....	58
Figura 32. Programa válvulas de control.....	59
Figura 33. Programa resistencias de calentamiento .....	59
Figura 34. Planta de destilación y mezclado, laboratorio de control.....	60
Figura 35. HMI planta de destilación UPB.....	62
Figura 36. Registro de lectura de información de la planta .....	66
Figura 37. Variables de proceso.....	66

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Planos de diseño en Solidworks.....	72
ANEXO B. Design and Automation of Atmospheric Binary Distillation Unit for Water and Ethanol (Póster) .....	72

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** DISEÑO DE UNA UNIDAD DE MEZCLADO Y DESTILACIÓN BINARIA ATMOSFÉRICA PARA ETANOL-AGUA

**AUTOR(ES):** FRANCISCO CALA CALDERÓN

**PROGRAMA:** Maestría en Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR(A):** CARLOS GERARDO HERNÁNDEZ CAPACHO

### RESUMEN

La destilación constituye uno de los procesos centrales de algunos sectores de la industria como la petroquímica, alimentos y sector farmacéutica, entre otros. Una de las características principales de la destilación es la capacidad de permitir la separación de componentes mediante procesos de calentamiento, para extraer productos valiosos que son utilizados en los diferentes campos de la economía. En este orden el reto de la industria y la academia es buscar mayores eficiencias y rendimientos de dicho proceso que permitan la obtención de productos de alta pureza y calidad dentro de márgenes económicamente rentables y sostenibles. El objetivo de este trabajo es el diseño de una unidad de destilación binaria para agua y etano a nivel de laboratorio, modular, compacta, versátil y automatizada que integra el control y supervisión del proceso mediante una plataforma amigable y confiable, dentro de un ambiente controlado y seguro. El diseño y construcción se plantea metodológicamente mediante el desarrollo de cinco etapas secuenciales, las cuales son: Modelamiento y dimensionamiento de la una unidad de destilación, diseño estructura mecánica de la unidad, selección de hardware, software e instrumentación requerida para la operación, implementación y montaje mecánico, pruebas de operación de la instrumentos y actuadores de la unidad. Lo anterior permitió avanzar en el diseño, ensamble y construcción de la planta. Entre los resultados obtenidos también están la simulación en MATLAB y los planos de diseños de la unidad piloto de destilación

### PALABRAS CLAVE:

CONTROL, DESTILACIÓN, HMI, HUMAN MACHINE INTERFACE, PLATO DE DESTILACIÓN

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** Design of a blending and Distilling Unit Atmospheric Binary for Ethanol-Water

**AUTHOR(S):** FRANCISCO CALA CALDERÓN

**FACULTY:** Maestría en Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR:** CARLOS GERARDO HERNÁNDEZ CAPACHO

### ABSTRACT

Distillation is one of the central processes of some sectors of the industry, such as petrochemicals, food, pharmaceutical sector among others. One of the main characteristics of distillation is the ability to allow the separation of components through heating processes, to extract valuable products that are used in different fields of the economy. In this order, the challenge of the industry and the academy is to seek greater efficiencies and returns from this process that allow obtaining products of high purity and quality within economically profitable and sustainable margins. The objective of this work is the design of a binary distillation unit for water and ethane at laboratory level, modular, compact, versatile and automated that integrates the control and supervision of the process through a friendly and reliable platform, within a controlled and safe environment. The design and construction methodologically arises through the development of five sequential stages, which are: Modeling and sizing of a distillation unit, design of mechanical structure of the unit, selection of hardware, software and instrumentation required for the operation, implementation mechanical assembly, operation tests of instruments and actuators of the unit. This allowed to advance in the design, assembly and construction of the plant. Among the results obtained are also the simulation in MATLAB and the design drawings of the pilot distillation unit.

### KEYWORDS:

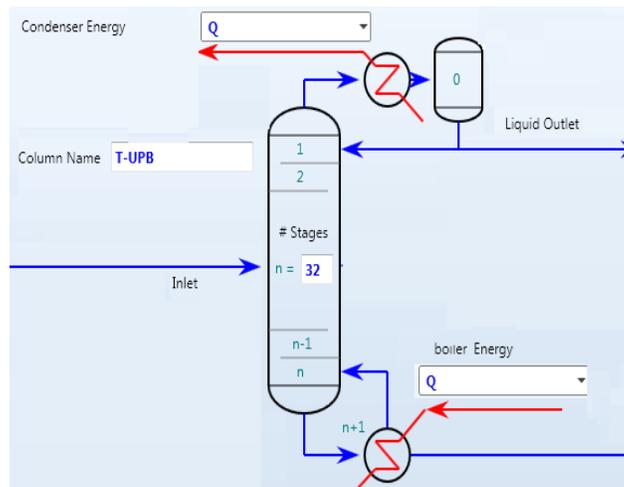
CONTROL, DESTILLATION, HMI, HUMAN MACHINE INTERFACE, DISTILLATION PLATE

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## INTRODUCCIÓN

La destilación es una técnica utilizada para la separación de Corrientes liquidas en uno o varios componentes. Este proceso permite fraccionar los diferentes componentes de una mezcla en función de las volatilidades relativas de los mismos, con el fin de obtener composiciones específicas de productos de destilado y de fondos como se ilustra en la figura 1 (Alzate Ibañez, 2010).

Figura 1. Diagrama columna destilación



Fuente: Autor

El diseño de una columna de destilación integrar diversos conceptos como equilibrio termodinámico y masa, propiedades termo-físicas del producto químico, conceptos de transferencia de calor, energía, balance de materia, teoría química de destilación, modelado y simulación entre otros (Pilot Plant Batch M. A. P. de Carvalho and, W. R. Curtis, The Pennsylvania State University, PA, USA).

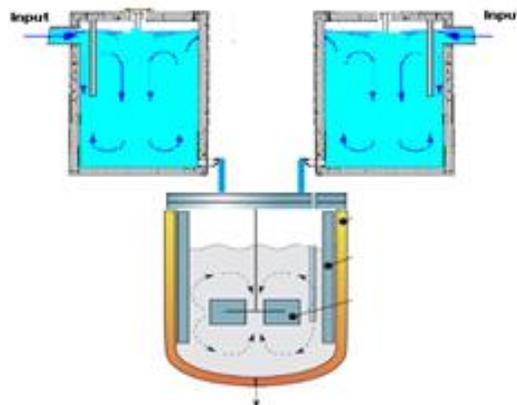
Los fenómenos de destilación y blending son temáticas en las cuales la industria actual requiere mayor desarrollo para mejorar la calidad de los productos e incrementar la eficiencia y rendimiento de los mismos, así como disminuir el impacto al medio ambiente mediante la menor generación de residuos en estos procesos industriales. En este orden, para el desarrollo de estudios y experimentación se requiere contar de una infraestructura mínima que permita a estudiosos e investigadores realizar las pruebas e investigaciones necesarias de estos fenómenos. Es ahí donde éste proyecto busca a través del diseño y construcción de una planta piloto de destilación, dotar a la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga, de una herramienta útil para el estudio de dichos temas. Uno de los desafío de los proceso de refinación, empresas petroquímicas y en

general de la industria que posee columnas de destilación atmosféricas dentro de su proceso; es el ahorro de energía es decir, la optimización o eficiencia energética del proceso que permita mejorar los rendimientos de la destilación, el consumo de energía, flujo de material y energía (Zheng Wang, 27 November 2018). En este orden uno de los fines de las pruebas e investigación de la unidad piloto de destilación esta determinar la eficiencia de trasferencia de masa, determinar la capacidad hidráulica y capacidad de eficiencia máxima, es decir la capacidad hidráulica en la que la eficiencia comienza a disminuir, caídas de presión en función de la tasa de ebullición, número de etapas requeridas para una separación óptima y termodinámica de equilibrio vapor-líquido etc. (Distillation Pilot Plant Design, Operating Parameters, and Scale-Up Considerations, By: T. Daniel Koshy and Frank Rukovena).

De esta manera éste proyecto tiene como objetivo el diseño y construcción de una planta piloto de destilación y mezclado binario atmosférico para Etanol-Agua. La cual contempla el dimensionamiento mecánico, la selección de hardware y software, la definición de sensores para control y monitoreo del proceso, ensamble y montaje de las partes, así como las pruebas de funcionalidad de cada elemento a través de una interfaz gráfica. La planta permitirá la experimentación sobre destilación dentro de ambiente controlado y seguro que permite a su vez avanzar en la comprensión de estos fenómenos así como plantear diferentes maneras de optimización de dicho proceso (René Wilfredo Jimenez Morale, Octubre De 2009.).

El desarrollo del proyecto es abordado por etapas secuenciales según los objetivos específicos señalados anteriormente. El diseño incorpora una arquitectura modular abierta de gran flexibilidad, la cual cuenta con cinco zonas principales: zona de calentamiento o ebullición, zona de destilación y reflujo, zona de condensación, zona de recolección del producto, zona de mezclado y carga.

Figura 2. Diagrama Unidad Mezclado



Fuente: Autor

Para blending el diseño dispone de facilidades para realizar mezclas mediante un circuito de tres tanques, tuberías, válvulas proporcionales y de control. Los tanques de productos y tanque de carga tienen funcionalidad multipropósito que pueden ser operados independiente como un sistema de mezclado cuando el proceso así lo requiera; el tanque de carga tiene facilidades para instalar un agitador magnético en su parte inferior facilitando la homogeneidad y/o preparación de mezclas que se requeridas como se muestra en la figura 2.

Finalmente, el diseño incorpora una plataforma de control basado en PLC, para la supervisión, monitoreo y control en tiempo real de la operación de la unidad.

Como productos de la presente tesis de maestría se tiene el artículo: Design and Automation of Atmospheric Binary Distillation Unit for Water and Ethanol. Este artículo fue presentado al evento IEEE Andescon 2018, el cual fue aceptado y presentado en la modalidad de póster los días 22 al 24 de agosto en la ciudad de Cali, Colombia (este póster corresponde al anexo B del presente documento de tesis). El artículo fue indexado en Scopus. También se tiene un trabajo de grado de un estudiante de pregrado titulado “pre-comisionamiento y comisionamiento del prototipo de la planta de destilación construida en la universidad Pontificia Bolivariana”.

El presente documento de tesis está organizado de la siguiente manera: El primer capítulo presenta el estado del arte con una aclaración de los diferentes términos empleados en el manejo de la planta de destilación. El capítulo dos presenta la metodología desarrollada durante el transcurso de la tesis y comprende la descripción del proyecto, el diseño, la implementación y el desarrollo de la interfaz con el usuario. El capítulo tres presenta los resultados y pruebas de funcionamiento. Finalmente se encuentran las conclusiones y recomendaciones.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Diseño de una unidad de mezclado y destilación binaria atmosférica para Etanol-Agua

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Dimensionar una unidad de destilación Etanol-Agua analizando su comportamiento ante variaciones de los parámetros de diseño.
- ✓ Diseñar la estructura mecánica de la unidad de mezclado y destilación binaria atmosférica para agua y etanol.
- ✓ Seleccionar el hardware, software e instrumentación necesaria para la operación de la unidad.
- ✓ Implementar el montaje mecánico de la unidad de destilación y mezclado.
- ✓ Realizar pruebas de operación manual de la instrumentación y los actuadores de la unidad de destilación a través de una interfaz gráfica.

## 1. MARCO TEÓRICO

Una de las características principales del proceso de destilación es la capacidad de permitir la separación de componentes mediante sistemas de calentamiento, de igual forma junto con el mezclado o blending constituyen una de las partes centrales de múltiples procesos industriales.

Es importante abordar algunos conceptos de destilación y consideraciones sobre columnas de destilación que permitan interpretar el diseño de la unida piloto de destilación de la UPB.

En el diseño de una columna se tiene en cuenta consideraciones de tipo hidráulico, tipo de material de construcción, dimensiones de torre, altura, diámetros de sus ductos, número de platos, consideraciones termodinámicas, balance de materia y energía, presiones de operación, temperaturas, entre otras. También la eficiencia en la columna se define respecto a la relación del número total de etapas de equilibrio ideales respecto al número de bandejas de la columna, así como el contacto a fondo entre el gas y el líquido. Otros aspectos importantes corresponden a la relación de reflujo a la torre y el flujo de alimentación a de carga a la columna (René Wilfredo Jimenez Morale, Octubre De 2009).

El diseño del sistema desarrollado es un sistema modular de fácil operación que permite operar el sistema en modo continuo y/o Batch. El cual permite caracterizar mediante cortes de temperatura o volumen constantes las fracciones de mezcla del producto (Agua-Alcohol) a destilar con puntos de ebullición por encima de 78 °C.

En forma general las partes de un sistema de destilación comprenden (Montazer, Shafaghieh, & Amouei, 2007).

Etapas de calentamiento o ebullición

Etapas de destilación y reflujo

Etapas de condensación

Etapas de recolección de producto

Etapas de carga y mezclado

Adicionalmente, el proyecto contempla una zona de mezclado y finalmente un sistema de control que permitirá la supervisión seguimiento y monitoreo en tiempo real de la operación.

La zona de mezclado o blending permite el manejo de relaciones de mezcla para ajuste y obtención de productos valiosos en márgenes requeridos por el cliente y/o investigadores en las pruebas o experimentos que realicen.

La unidad planteada en este proyecto permitirá brindar soluciones a las necesidades científicas y tecnológicas de la región en temas de destilación y blending mediante una unidad automatizada y de fácil manejo. Entre otros beneficios esperados del proyecto está el poder realizar estudio de principios básico de destilación y mezclado, análisis de desempeño en diferentes arreglos y esquemas de operación

en unidades de destilación, evaluar diferentes relaciones de reflujos, tipos de empaquetamiento y niveles de carga, permitir realizar análisis de eficiencia energética, determinar perfiles de concentración, perfiles de temperatura, desarrollo de curvas de destilación, optimizar y analizar esquemas operacionales de las plantas de destilación, análisis de modelos dinámicos, evaluación de estrategia de control regulatorio y avanzado aplicada a modelos no lineales en otros muchos estudios.

## 1.1 ESTADO DEL ARTE

Desde la antigüedad las técnicas de destilación, separación y mezclado ha venido desarrollando y perfeccionando y avances en diferentes centros de conocimiento han dedicado grandes recurso y esfuerzos en mejorar las técnicas de destilación que permitan la obtención de productos cada vez más puros y de mayor calidad.

Las primeras formas de destilación que se tiene conocimiento, corresponden a la obtención de esencias y bebidas alcohólicas mediante el calentamiento de una mezcla y/o agua-alcohol. En el caso de las bebidas alcohólicas se realizaba la separación de los componentes más livianos incrementando la temperatura de la mezcla y obteniendo así el destilado el cual variaba su concentración dependiendo del ajuste que se realizaba en los alambiques.

Este proceso se fue perfeccionado a medida de los siglos, haciendo cada vez más eficiente la extracción de componentes siendo así como a mediados del siglo XIX con el auge de la industria del petróleo se dio un avance significativo en este proceso y aparece el término de columnas de destilación, las cuales se utilizan para obtención de productos derivados del petróleo. El resultado de la evolución tecnológica permitió obtener de una manera más eficaz y eficiente productos valiosos a través de una serie de etapas de evaporaciones y condensaciones escalonadas y acopladas entre sí.

Existen diferentes tipos de columnas de destilación cada una diseñada para un tipo de separación determinada y cada una difiere entre sí según su complejidad. Sin embargo, una manera sencilla de clasificar las columnas de destilación es según la forma de operar, para lo cual se pueden clasificar en dos tipos: columnas batch y columnas continuas, La elección de uno u otro tipo depende a menudo de la clase de industria y de la cantidad de producto a procesar, siendo así como para la operación batch por ejemplo se aplica para producción en lotes y el método continuo cuando se requiere destilar grandes volúmenes de producto (M. A. P. de Carvalho and W. R. Curtis).

En la actualidad los procesos de destilación continúan estudiándose y mejorando dada su importancia. Es el caso de los sectores como la petroquímica y refinación de crudo, donde la destilación es el eje central de su operación, debido a que en ella se tiene lugar la separación de los diferentes componentes como; gasolinas,

ACPM, Nafta, jet de aviación, gasóleos etc. Este proceso de separación se lleva a cabo debido a las distintas temperaturas de evaporación del petróleo, permitiendo obtener combustible y compuestos valiosos que son insumos para diferentes sectores de la industria.

A nivel internacional existen firmas fabricantes de columnas de destilación como: GT instruments, G.U.N.T Gerätebau GmbH, Armfield Limited, Etc. que diseñan y construyen unidades de destilación a nivel de laboratorio cuyos costos son elevados, dependiendo de los requerimientos del cliente. A nivel país existen algunas firmas representantes y distribuidores de estas marcas internacionales quienes distribuyen columnas de destilación para fines específicos dependiendo de las necesidades de los clientes.

En Colombia algunas universidades e instituciones cuentan en sus laboratorios con unidades de destilación pilotos para estudio e investigación y desarrollo de proyectos. Es así como en la región se tiene instituciones como la Universidad Industrial de Santander, el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) y la Universidad Pontificia Bolivariana sede Medellín, entre otras.

Entre los logros obtenidos a través de este proyecto se tiene el desarrollo de conocimiento, capacidades y tecnología, que permita solucionar y mejorar los procesos actuales de destilación de la industria nacional en diferentes aspectos como son: la eficiencia, calidad de productos, mayores rendimientos, entre otros. Además se genera un proceso de apropiación de tecnología que procure una disminución muy significativa de la brecha que actualmente existe con respecto a los países más desarrollados e industrializados y plantea evitar la dependencia tecnológica inherente a la adquisición de equipos y dispositivos extranjeros, la formación de un capital intelectual y una base de conocimiento propios, la potencial creación de nuevos nichos de desarrollo de tecnología, la formación de nuevos investigadores y la inyección de recursos a los procesos de investigación en las universidades del país mediante el desarrollo de tecnología nacional.

Lo anterior permite disminuir la brecha tecnológica entre Colombia y los referentes líderes mundiales, generando una mayor competitividad. Además de brindar respuesta a problemáticas y necesidades de industria del área local y nacional que utilizan en sus procesos la destilación

## 1.2 CONCEPTOS BÁSICOS

Algunos conceptos importantes a tener cuenta en un proceso de destilación automatizado según (APV Americas, Engineered Systems, Fourth Edition) son:

**Destilación:** La destilación es una operación de separación donde una corriente de alimentación dada es sometida a procesos transferencia de masa, calor y cantidad de movimiento para obtener unas corrientes de productos determinados.

**Presión de vapor:** se define como la presión a la cual una sustancia pura a una temperatura fija se encuentra en el equilibrio entre el líquido y el vapor

**Temperatura de saturación:** Es la temperatura a la cual una sustancia pura a una presión dada se encuentra en el equilibrio entre el líquido y el vapor

**Temperatura de burbuja o punto inicial de ebullición:** Es la temperatura en la que se forma la primera burbuja de vapor de cualquier mezcla a presión constante.

**Presión de rocío:** Es la presión a la que cualquier mezcla de varios componentes a una temperatura constante; forma su primera gota infinitesimal de líquido

**Plato de destilación:** Un plato de destilación es una barrera física que permite el flujo líquido-vapor a través de él despojando el componente menos pesado y enriqueciendo el pesado.

**Un azeótropo (o mezcla azeotrópica):** es una mezcla líquida de composición definida (única) entre dos o más compuestos químicos que hierve a temperatura constante y que se comporta como si estuviese formada por un solo componente, por lo que al hervir su fase de vapor tiene la misma composición que su fase líquida.

**HMI (Human Machine Interface):** Término en sentido concreto que muestra la forma explícita en la creación de reglas que permite a la gente y las máquinas establecer los criterios de comunicación para la realizar tareas. Establece cómo los sistemas se encuentran diseñados en su fabricación del hardware, software en función de la interacción.

**Entalpia:** Magnitud termodinámica simbolizada con la letra H mayúscula, definida como el flujo de energía térmica a presión constante o cantidad de energía/calor que un sistema intercambia con su entorno.

## 2. METODOLOGÍA

El diseño de la unidad de mezclado y destilación binaria, plantea cinco objetivos específicos los cuales se desarrollan metodológicamente, como se menciona a continuación:

- Dimensionar una unidad de destilación Etanol-Agua analizando su comportamiento ante variaciones de los parámetros de diseño.

Es la etapa inicial del diseño de la unidad de destilación, se parte con una simulación realizada en software para su modelamiento; a través de la cual se fijan los principales parámetros y características de diseño de la unidad como son la capacidad, volumen de carga, presiones, temperatura, tipo de arreglo, reflujos etc. Una vez obtenida la simulación se realiza la selección comercial de las diferentes partes y secciones de la unidad misma bajo las dimensiones y los parámetros deseados (R. Katzen).

- Diseñar la estructura mecánica de la unidad de mezclado y destilación binaria atmosférica para agua y etanol.

Con base en la información de la anterior y búsqueda bibliográfica señaladas en la bibliografía, se realiza la selección de las diferentes partes y etapas de la unidad, determinando diámetros de líneas, tamaño de reactores, diámetros de la columna, tipos de platos, consumo de energéticos, requerimiento de servicios (aire, agua, etc.), sistema auxiliar de enfriamiento entre otros (APV Americas, Engineered Systems, Fourth Edition).

- Seleccionar el hardware, software e instrumentación necesaria para la operación de la unidad.

Se realiza la selección de los requerimientos de instrumentación requerida para operar como son: Tipo de sensores de temperatura, presión, nivel, etc. Se define el software y hardware de acuerdo a la arquitectura de control a implementar. El sistema de control es el encargado del procesamiento de los datos y captura de toda la información de proceso.

- Implementar el montaje mecánico de la unidad de destilación y mezclado.

La construcción se realiza teniendo en cuenta la modularidad del diseño, aplicando las normas de seguridad ambientales. Se construye y ensamblan las partes mecánicas e integran los diferentes sensores para medición de las variables críticas de la planta, dicha información se incorpora al sistema de control de la unidad. Posteriormente se realiza la configuración de señales y programación de control y finalmente se realizan pruebas de cada una de las señales de la planta garantizando su funcionalidad.

- Realizar pruebas de operación manual de la instrumentación y los actuadores de la unidad de destilación a través de una interfaz gráfica.

Una vez instalado el software supervisorio, se desarrolla la interface HMI de la unidad, despliegues gráficos, configuración de base de datos y procesamiento de información general de proceso. Terminada la construcción mecánica y conexionado de instrumentos en la planta se realizan las pruebas funcionales, las cuales contemplan la verificación y respuesta de los diferentes sensores instalados en la unidad como: presión, temperatura, nivel y actuadores eléctricos, resistencias he instrumentación en general; luego se verifica el desempeño del hardware instalado y la interfaz de usuario. En esta etapa final se recolecta información en línea, también se realiza verificación de carga voltajes, corrientes de operación y capacidad de procesamiento e información de proceso en forma general.

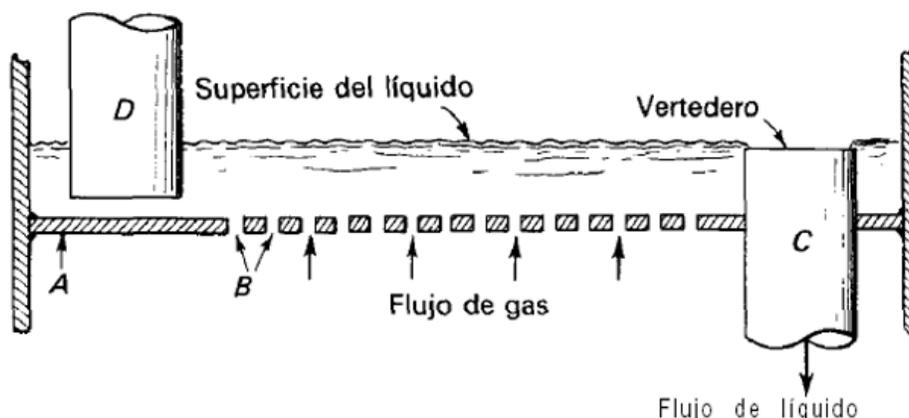
## 2.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Uno de los aspectos claves en la destilación comprende, la eficiencia de la columna la cual se define como la relación del número total de etapas de equilibrio ideales respecto al número de bandejas en la columna. Una etapa de destilación ideal es una en el que la fase líquida y vapor saliente establece un equilibrio entre sí, alta eficiencia de la columna indica un contacto a fondo entre el gas y el líquido.

En la figura 3 se muestra el funcionamiento del fenómeno de destilación dentro de una columna (René Wilfredo Jimenez Morale, Octubre De 2009.).

El diseño del plato permite que flujo de líquido y gas fluyan a través de las ranuras del plato permitiendo que fluyan las corrientes del flujo ascendente de gas a través de las aberturas (vapor) y el líquido en contraflujo a través del vertedero. En forma general el gas y el líquido fluyen en forma pulsante alternándose en el paso a través de cada abertura, el tubo bajante permite el reboce de flujo de líquido destilado entre los platos. Como se muestra en la figura 4.

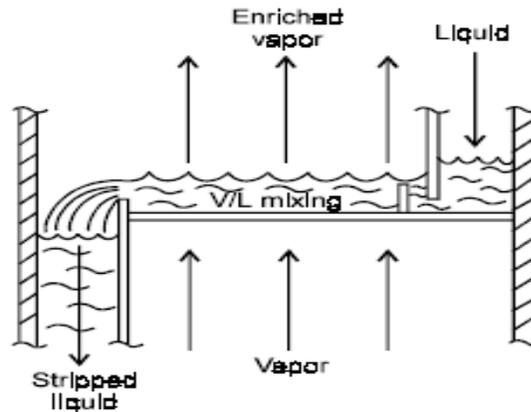
Figura 3. Proceso de destilación



Fuente: R. Katzen, P.W. Madson and G.D. Moon, Jr. KATZEN International, Inc., Cincinnati, Ohio, USA.

En el proceso de destilación el gas se pone en contacto con el líquido que se derrama del plato y cae al inferior por el vertedero, en cada plato se debe garantizar un mínimo nivel de líquido mediante la utilización en el borde del plato de esclusa o rebosadero para mejorar la distribución del líquido descendente

Figura 4. Flujos dentro de una columna



Fuente: Ethanol distillation: the fundamentals R. Katzen, P.W. Madson and G.D. Moon, Jr KATZEN International, Inc., Cincinnati, Ohio, USA

Algunos aspectos importantes a tener cuenta son:

**Presión:** La presión de diseño para recipientes y líneas están de acuerdo con el siguiente criterio, para presiones atmosféricas entre 14.7 psi y 100 psi:

$$Presión\_diseño(PSI) = Presión\_máxima\_operación + 50(PSI)$$

**Temperatura:** La temperatura de diseño para recipientes y líneas está de acuerdo con el siguiente criterio, para temperaturas entre 68 °F y 350 °F:

$$Temperatura\_diseño(F) = Temperatura\_máxima\_operación + 50(F)$$

Para el dimensionamiento de los equipos y accesorios se tiene en cuenta las propiedades de los fluidos a destilar (Agua, etanol). Entre las consideraciones fundamentales de diseño de una torre de destilación se tienen:

- A. Tipo de dispositivo de contacto a ser empleado (bandejas, empaquetamiento. etc.)
- B. Relación de reflujo que es requerido
- C. Energía que se requiere
- D. Cuáles son las dimensiones generales de la unidad
- E. Volúmenes, flujos, temperaturas de trabajo

F. Número de platos de la columna y además consideraciones prácticas de diseño

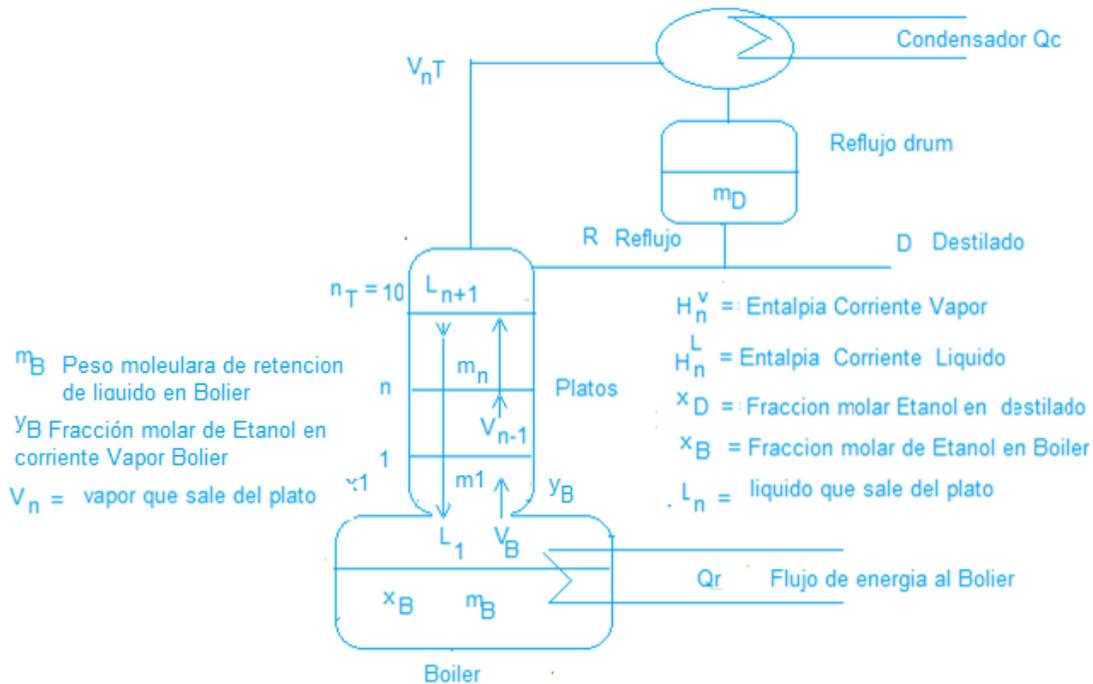
Las anteriores consideraciones se resuelven en mayor detalle en lo que sigue del documento que permiten entender e interpretar la funcionalidad del diseño final.

2.2 SIMULACIÓN BASADA EN MODELOS DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN.

El análisis de una columna de destilación binaria (componente A y componente B) tipo batch, se basa en balances de materia, balances de energía y equilibrio entre fases. Se debe determinar inicialmente las ecuaciones básicas de balances molar total, balance molar de cada componente (agua, etanol), balance de energía y relaciones algebraicas para determinar la hidráulica en los platos. Además de las condiciones de equilibrio liquido-vapor, entalpías, flujo de líquido que sale de cada plato, densidades y pesos moleculares de la mezcla a destilar (Green & Perry, 2007).

El proceso de destilación se muestra en diagrama simplificado de la figura 5, donde se señalan los flujos y relaciones básicas de operación tenidas en cuenta durante la simulación.

Figura 5. Columna destilación Batch



Fuente: Autor.

En la figura 5 se representa en forma esquematizada una columna convencional donde se lleva a cabo la operación de destilación con una caldera, condensador, sectores de enriquecimiento y agotamiento y tanque de interface. El caudal de calor que se suministra en la caldera se representa por  $Q_r$  mientras que el que se extrae en el condensador se representa por  $Q_c$ .

El caudal de calor que se suministra en la caldera permite la generación de vapor, permitiendo la formación de una corriente ascendente en la columna con caudal de vapor  $V$ , el vapor después de salir del plato superior  $V_{nT}$ , pasa a través del sistema de refrigeración donde parcial o totalmente son condensados los vapores, los cuales son recogidos en el acumulador (Drum de reflujo). Desde el cual se generan las corrientes de reflujo (R) y de destilado (D). La corriente de líquido que retorna a la columna corresponde a  $L_n$  (llamado reflujo). La relación  $L/V$ , se conoce como razón de reflujo interna y puede variar de etapa a etapa dentro del sector de enriquecimiento y análogamente en el sector de agotamiento.  $L$  es el caudal genérico del líquido que cae a lo largo de la columna en uno u otro sector y  $V$  es el correspondiente de vapor que asciende desde el boiler por el sector de agotamiento y continúa por el correspondiente de enriquecimiento (René Wilfredo Jimenez Morale, Octubre De 2009.).

Los parámetros termodinámicos que gobiernan la destilación son la temperatura y presión del sistema, por tal motivo se considera como variables del proceso todas aquellas que puedan afectar el equilibrio entre las fases vapor-líquido (Chr. Remberg\*, 1994).

Las premisas del modelo desarrollado son las siguientes:

- ✓ Mezclado perfecto y equilibrio en todos los platos
- ✓ Presión de operación atmosférica y eficiencia en cada plato del 50%
- ✓ Se desprecia la acumulación de vapor en cada plato
- ✓ Condensación total sin sub-enfriamiento en el condensador
- ✓ La fase de vapor se considera gas ideal
- ✓ La solución líquida altamente no ideal se simula con el modelo termodinámico de Margules
- ✓ la presión parcial es calculada con la Ecuación de Antoine
- ✓ La hidráulica de los Platos se calcula usando la ecuación de vertedero circular de Francis
- ✓ La dinámica de la energía interna es muy rápida, lo que hace que su derivada sea igual a cero

ECUACIONES DE BALANCES DE MASA Y ENERGÍA (Green & Perry, 2007) (1)

Balance molar total:

$$\frac{dm_B}{dt} = L_1 - V_B = -D \quad (2)$$

Balance molar del componente:

$$\frac{dm_B x_B}{dt} = L_1 x_1 - V_B y_B \quad (3)$$

Balance de energía:

$$Q_R + L_1 H_1^L - V_B H_B^V = 0 \quad (4)$$

Plato del fondo (plato n=1):

Balance molar total:

$$\frac{dm_1}{dt} = L_2 + V_B - L_1 - V_1 \quad (5)$$

Balance de componente plato 1:

$$\frac{dm_1 x_1}{dt} = L_2 x_2 + V_B y_B - L_1 x_1 - V_1 y_1 \quad (6)$$

Balance de energía plato 1:

$$L_2 H_2^L + V_B H_B^V - L_1 H_1^L - V_1 H_1^V = 0 \quad (7)$$

Plato intermedio: n

Balance molar

$$\frac{dm_n}{dt} = L_{n+1} + V_{n-1} - L_n - V_n \quad (8)$$

Balance molar del componente

$$\frac{dm_n X_n}{dt} = L_{n+1} X_{n+1} + V_{n-1} Y_{n-1} - L_n X_n - V_n Y_n \quad (9)$$

Balance de energía

$$L_{n+1} H_{n+1}^L + V_{n-1} H_{n-1}^V - L_n H_n^L - V_n H_n^V = 0 \quad (10)$$

Plato Tope: N=NT

(11)

Balance molar

(12)

$$\frac{dm_{NT}}{dt} = R + V_{NT-1} - L_{NT} - V_{NT}$$

Balance molar del componente

$$\frac{dm_{NT}X_{NT}}{dt} = Rx_D + V_{NT-1}y_{NT-1} - L_{NT}X_{NT} - V_{NT}y_{NT}$$

(13)

Balance de energía

$$RH_D^L + V_{NT-1}H_{NT-1}^V - L_{NT}H_{NT}^L - V_{NT}H_{NT}^V = 0$$

(14)

Condensador tambor de reflujo:

Balance molar

$$\frac{dm_D}{dt} = V_{NT} - R - D$$

Balance molar del componente

$$\frac{dm_Dx_D}{dt} = V_{NT}y_{NT} - (R + D)x_D$$

Cálculo de entalpías:

La entalpia se representa con la letra H, para determinar la entalpia del líquido Etanol-Agua se utilizan las siguiente ecuación y constantes de la tabla 1 y tabla 2 (Jana, 2011).

$$H^L = a + bT + cT^2$$

$$H^V = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4$$

Temperatura °R

$$H = \text{Btu/Lb mol}$$

$$1 \text{ Btu/Lb mol} = 2.326 \text{ J/g mol}$$

Tabla 1. Constantes Ecuación Entalpia liquido Etanol-Agua temperatura en °R y Entalpia En Btu/lbmol

COMPONENTE	a	b	C
Etanol (1)	0.4046 E3	-0.2410 E2	0.4728 E-1
Agua (2)	-0.8783 E4	0.1758 E2	0.3651 E-3

Fuente: Chemical -Process Modelling

Tabla 2 Constantes Ecuación Entalpia Vapor Etanol-Agua temperatura en °R y Entalpia En Btu/lbmol

COMPONENTE	A	B	C	D	E
Etanol	0.1064 E5	0.7516 E1	0.11513 E-1	-0.1682 E-5	0.9036 E-10
Agua	0.1546 E5	0.8022 E1	-0.4745 E-3	0.6878 E-6	-0.1439 E-9

Fuente: Chemical -Process Modelling

$$TR = (1.82 T) + 492 \quad T = \text{grados } ^\circ\text{C},$$

$X = \text{Fracción molar en fase líquido}$

Hidráulica de los platos

El flujo de líquido que sale de cada plato se calcula por la ecuación de Francis de vertederos (Green & Perry, 2007).

$$L = \frac{\text{Densa} \times W_L \times 999 \left[ \frac{183.2 \times m \times MW_A}{\text{Densa} \times D_{col} \times D_{col}} - \frac{W_H}{12} \right]^{1.5}}{MW_A}$$

$D_{col}$ : Diámetro de la columna en pulgadas

$\text{Densa}$ : Densidad promedio de la mezcla líquida en el plato en  $Lb/ft^3$

$L$ : Flujo líquido en  $Lb \text{ mol/hr}$

$MW_A$ : Peso molecular promedio de la mezcla líquida en  $Lb/Lb \text{ mol}$

$W_h$ : Altura del vertedero en pulgadas

$W_L$ : Longitud del vertedero en pulgadas

$m$ : Líquido retenido en el plato en  $Lb \text{ mol}$

$$1 \text{ cm} = 0.3937 \text{ in}$$

$$1 \text{ Lb mol/hr} = 7.36 \text{ g mol/min}$$

$$MW_1 = 46.0634 \quad \text{Peso molecular del Etanol, lb/lb mol}$$

$$MW_2 = 18.0152 \quad \text{Peso molecular del agua, lb/lb mol}$$

$$\delta_1 = 0.789 \times 62.42587 \quad \text{Densidad del etanol, lb/pies}^3$$

$$\delta_2 = 1.0 \times 62.42587 \quad \text{Densidad del agua, lb/pies}^3$$

$$1 \text{ g/cm}^3 = 62.42587 \text{ Lb/ft}^3$$

Figura 6. Dimensiones entre platos columna destilación



Fuente: Autor.

Ecuación de Antoine para calcular la Presión Parcial (Punto de Burbuja) (Green & Perry, 2007)

$$\ln P_i^s = A_i - \frac{B_i}{T + C_i}$$

$$T = ^\circ K$$

$$P = \text{mmHg}$$

Tabla 3. Constantes Antoine (Presión de vapor en mm Hg y Temperatura en K)

COMPONENTE	$A_i$	$B_i$	$C_i$	Rango de Temp. (K)
Etanol	18.5242	3578.91	-50.50	270-369
Agua	0.1546 E5	0.8022 E1	-0.4745 E-3	284- 441

Fuente: Chemical -Process Modelling

Modelo de Margules (Perry's chemical engineer's handbook).

$$\log_{10} \gamma_1 = X_2^2 [A_{12} + 2X_1(A_{21} - A_{12})]$$

$$\log_{10} \gamma_2 = X_1^2 [A_{21} + 2X_2(A_{12} - A_{21})]$$

$$A_{12} = 0.6848$$

$$A_{21} = 0.3781$$

Equilibrio Líquido-Vapor

Figura 7. Arreglo platos columna destilación



Fuente: Autor.

Datos de simulación:

La simulación se realizó en MATLAB usando el método de integración de Euler para la solución de las ecuaciones diferenciales del modelo y se usó un paso de integración de 0.001 minutos.

En estado dinámico corre el modelo para un periodo de 90 minutos, simulando cinco platos ideales con operación a reflujo total, las características de diámetro de la columna se consideraron de 7.5 cm, con un tubo vertedero de diámetro de 12.7mm y una altura de vertedero de 4.65mm. Los anteriores parámetros se determinaron basados en la literatura de plantas experimentales similares de centros de investigación, así como información de fabricantes de columnas como GeCiL Process entre otros (Norman P. Lieberman, 2003).

Los siguientes parámetros se determinados basados en literatura y fabricantes de estos equipos

NT=5; % Número de platos ideales

DC=7.5; % Diámetro de la columna en cm

dw=12.7; % Diámetro del tubo vertedero en mm

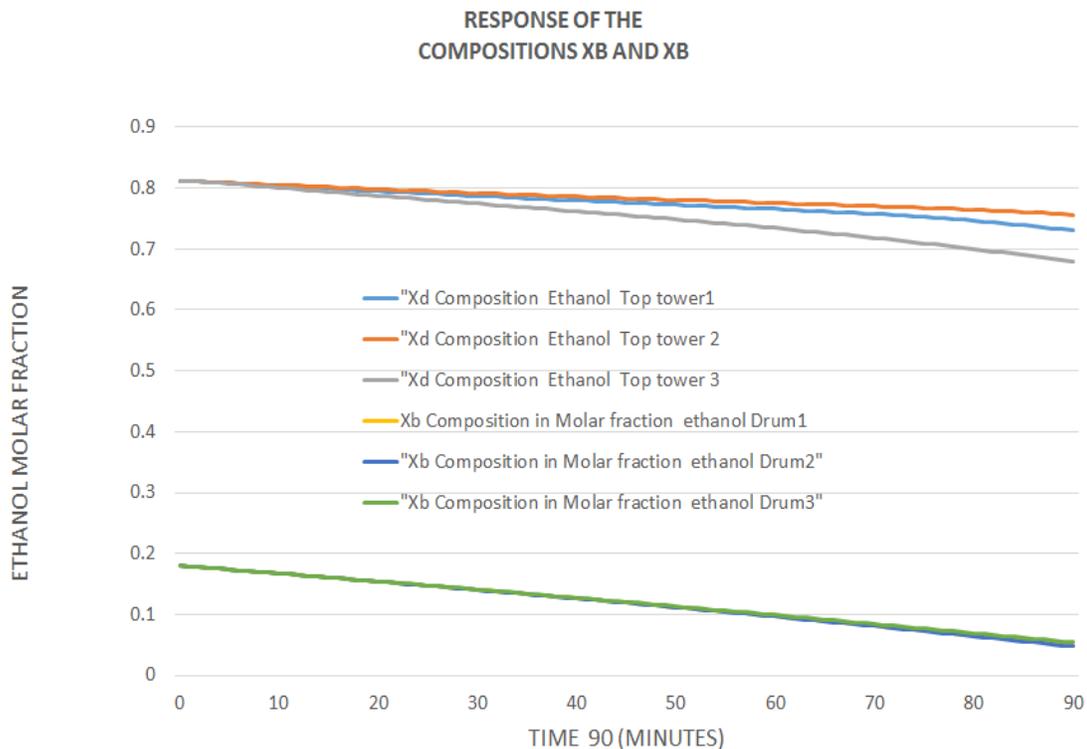
hw=4.65; % Altura del vertedero tipo tubo, mm

Qr=0.5\*8000\*60; % duty J/min

Xb=0.4; % fracción molar de etanol en el tambor de carga

P=760 % presión operación de la torre 1 atm, 760 mmHg

Figura 8. Respuesta modelo con duty 240, 280 y 192 KJ/min



Fuente: Autor

La figura 8 muestra la respuesta en lazo abierto del modelo de la torre para un producto de cima D =3 gmol/min. Aplicando diferentes flujos de calor en el rehervidor

para  $Q_r = 240$  KJ/min, 288 KJ/min y 192 KJ/min. Donde se observa la respuesta del sistema a cada variación en el duty suministrado y la respuesta en la composición de fracción molar de etanol en la cima de la torre ( $X_d$ ). Se parte de una concentración de 0.81% y se obtienen diferentes composiciones de acuerdo a las variaciones respectiva de calor en el rehervidor; pasando a 0.75% al primer cambio, 0,73% al segundo y 0.68% en el tercero cambio en la composición de fracción molar de etanol respectivamente. Igualmente, la variación de composición en fracción molar de etanol en el tambor del fondo de torre ( $X_b$ ) iniciado con 0.18% y variando de 0.047%, 0.05% y 0.054% respectivamente para los mismos periodos de producción señalados.

En general la predicción del modelo en las corridas de 90 minutos permite estimar el comportamiento de la planta piloto de destilación, observando las variaciones de la composición dinámica de la carga, en cada corrida. Además se logra apreciar la separación del destilado (etanol) en la cima de la torre y la disminución de concentración en el boiler en el tiempo. El modelo recrea la geometría de los platos, condiciones de carga, temperaturas, diámetros de columnana etc. Según los datos reales de diseño.

#### Variables analizadas

$X_b$  = Fracción molar de etanol en boiler, composición que está variando

$T_b$  = Temperatura en boiler

$T_5$  = Temperatura en Cima plato 5

$X_d$  = Composición del destilado en la cima de la torre

$V_b$  = Vapor boiler

$V_1$  = Vapor en fondo

$V_5$  = Vapor en cima

$L_1$  = líquido plato 1

$R$  = Reflujo

$D$  = Producción Gramos

La información obtenida de las corridas permitieron evaluar condiciones de operación como son la respuesta del destilado a temperatura de 78 °C, presión 760 mmhg y reflujo total condiciones hidráulicas y variaciones de duty suministrado en al bolier, entre otras.

A continuación, se muestran las tablas con las respectivas tabulaciones logradas de la simulación.

Figura 9. Datos simulación Matlab 90 minutos de prueba

Número	Prueba, 288 KJ/min		Prueba, 240 KJ/min		Prueba, 192 KJ/min	
	xd2 Cima Torre	xb2 Fondo Torre	xd1 Cima Torre	xb1 Fondo Torre	xd3 Cima Torre	xb3 Fondo Torre
0	0.8119	0.18	0.8119	0.18	0.8119	0.18
1	0.8115	0.1787	0.8115	0.1787	0.8115	0.1787
2	0.8109	0.1775	0.8108	0.1775	0.8107	0.1775
3	0.8102	0.1762	0.8099	0.1762	0.8096	0.1762
4	0.8094	0.1749	0.809	0.1749	0.8084	0.1749
5	0.8086	0.1736	0.8081	0.1736	0.8071	0.1736
6	0.8079	0.1723	0.8072	0.1723	0.8058	0.1724
7	0.8071	0.1711	0.8063	0.1711	0.8044	0.1711
8	0.8064	0.1698	0.8054	0.1698	0.8031	0.1698
9	0.8056	0.1685	0.8045	0.1685	0.8018	0.1685
10	0.8049	0.1672	0.8036	0.1672	0.8004	0.1672
11	0.8042	0.1659	0.8027	0.1659	0.7991	0.1659
12	0.8035	0.1646	0.8018	0.1646	0.7978	0.1646
13	0.8028	0.1632	0.8009	0.1633	0.7964	0.1633
14	0.802	0.1619	0.8	0.162	0.7951	0.162
15	0.8013	0.1606	0.7992	0.1606	0.7938	0.1607
16	0.8007	0.1593	0.7983	0.1593	0.7925	0.1594
17	0.8	0.158	0.7975	0.158	0.7912	0.1581
18	0.7993	0.1566	0.7966	0.1567	0.7899	0.1568
19	0.7986	0.1553	0.7958	0.1553	0.7886	0.1555
20	0.798	0.154	0.795	0.154	0.7873	0.1542
21	0.7973	0.1526	0.7942	0.1527	0.7861	0.1528
22	0.7966	0.1513	0.7934	0.1513	0.7848	0.1515
23	0.796	0.1499	0.7925	0.15	0.7835	0.1502
24	0.7954	0.1486	0.7917	0.1486	0.7822	0.1489
25	0.7947	0.1472	0.791	0.1473	0.781	0.1475
26	0.7941	0.1458	0.7902	0.1459	0.7797	0.1462
27	0.7935	0.1445	0.7894	0.1446	0.7784	0.1448
28	0.7929	0.1431	0.7886	0.1432	0.7772	0.1435
29	0.7922	0.1417	0.7878	0.1418	0.7759	0.1422
30	0.7916	0.1403	0.7871	0.1405	0.7746	0.1408
31	0.791	0.1389	0.7863	0.1391	0.7734	0.1395
32	0.7904	0.1375	0.7856	0.1377	0.7721	0.1381
33	0.7899	0.1361	0.7848	0.1363	0.7708	0.1368
34	0.7893	0.1347	0.7841	0.1349	0.7696	0.1354
35	0.7887	0.1333	0.7833	0.1335	0.7683	0.134
36	0.7881	0.1319	0.7826	0.1321	0.767	0.1327
37	0.7875	0.1305	0.7818	0.1307	0.7657	0.1313
38	0.787	0.1291	0.7811	0.1293	0.7644	0.1299
39	0.7864	0.1277	0.7804	0.1279	0.7632	0.1286
40	0.7858	0.1262	0.7797	0.1265	0.7619	0.1272
41	0.7853	0.1248	0.779	0.1251	0.7606	0.1258
42	0.7847	0.1233	0.7782	0.1236	0.7593	0.1244
43	0.7842	0.1219	0.7775	0.1222	0.758	0.123
44	0.7836	0.1204	0.7768	0.1208	0.7566	0.1216
45	0.7831	0.119	0.7761	0.1193	0.7553	0.1202
46	0.7826	0.1175	0.7754	0.1179	0.754	0.1188
47	0.782	0.1161	0.7747	0.1164	0.7526	0.1174
48	0.7815	0.1146	0.774	0.115	0.7513	0.116
49	0.781	0.1131	0.7733	0.1135	0.7499	0.1146
50	0.7805	0.1116	0.7726	0.112	0.7486	0.1132
51	0.7799	0.1101	0.7719	0.1106	0.7472	0.1118
52	0.7794	0.1086	0.7712	0.1091	0.7458	0.1104
53	0.7789	0.1071	0.7705	0.1076	0.7444	0.109

Número	Prueba, 288 KJ/min		Prueba, 240 KJ/min		Prueba, 192 KJ/min	
	xd2 Cima Torre	xb2 Fondo Torre	xd1 Cima Torre	xb1 Fondo Torre	xd3 Cima Torre	xb3 Fondo Torre
54	0.7784	0.1056	0.7698	0.1061	0.743	0.1075
55	0.7779	0.1041	0.7691	0.1046	0.7415	0.1061
56	0.7773	0.1026	0.7684	0.1032	0.7401	0.1047
57	0.7768	0.1011	0.7676	0.1016	0.7387	0.1033
58	0.7763	0.0996	0.7669	0.1001	0.7372	0.1018
59	0.7758	0.098	0.7662	0.0986	0.7357	0.1004
60	0.7753	0.0965	0.7655	0.0971	0.7342	0.0989
61	0.7748	0.0949	0.7647	0.0956	0.7327	0.0975
62	0.7743	0.0934	0.764	0.0941	0.7312	0.096
63	0.7738	0.0918	0.7632	0.0925	0.7296	0.0946
64	0.7733	0.0903	0.7625	0.091	0.7281	0.0931
65	0.7728	0.0887	0.7617	0.0895	0.7265	0.0917
66	0.7722	0.0871	0.7609	0.0879	0.7249	0.0902
67	0.7717	0.0855	0.7601	0.0864	0.7232	0.0888
68	0.7712	0.084	0.7592	0.0848	0.7216	0.0873
69	0.7707	0.0824	0.7584	0.0832	0.7199	0.0858
70	0.7702	0.0808	0.7575	0.0817	0.7183	0.0843
71	0.7696	0.0792	0.7566	0.0801	0.7166	0.0829
72	0.7691	0.0775	0.7556	0.0785	0.7148	0.0814
73	0.7685	0.0759	0.7547	0.0769	0.7131	0.0799
74	0.768	0.0743	0.7536	0.0753	0.7113	0.0784
75	0.7674	0.0727	0.7526	0.0737	0.7095	0.0769
76	0.7668	0.071	0.7515	0.0721	0.7076	0.0754
77	0.7663	0.0694	0.7503	0.0705	0.7058	0.074
78	0.7657	0.0677	0.7491	0.0689	0.7039	0.0725
79	0.765	0.0661	0.7479	0.0673	0.702	0.071
80	0.7644	0.0644	0.7466	0.0657	0.7	0.0695
81	0.7637	0.0627	0.7452	0.0641	0.698	0.068
82	0.763	0.0611	0.7438	0.0624	0.696	0.0665
83	0.7623	0.0594	0.7423	0.0608	0.694	0.0649
84	0.7615	0.0577	0.7407	0.0592	0.6919	0.0634
85	0.7607	0.056	0.7391	0.0575	0.6898	0.0619
86	0.7598	0.0543	0.7374	0.0559	0.6876	0.0604
87	0.7588	0.0526	0.7356	0.0542	0.6854	0.0589
88	0.7577	0.0509	0.7338	0.0526	0.6832	0.0574
89	0.7566	0.0492	0.7319	0.0509	0.6809	0.0559
90	0.7553	0.0474	0.7299	0.0493	0.6786	0.0543

Fuente Autor

### 2.3 DISEÑO UNIDAD DE MEZCLADO Y DESTILACIÓN BINARIA ATMOSFÉRICA PARA AGUA Y ETANOL.

El diseño está basado en el modelamiento inicial del proceso, y es el resultado de reuniones con el grupo de investigación Control Industrial y el director del proyecto, donde se definieron los aspectos básicos del diseño, como son capacidad de la torre, capacidad del boiler, energía requerida, dimensiones de estructura y soportes, diámetros de reactores, tuberías, tipo de materia de la columna, partes mecánicas, características de los recipientes de producto y carga, líneas de proceso, entre otros aspectos. También se analiza las diferentes áreas de conocimiento que intervienen

para el desarrollo del proyecto, entre las que se destacan control de procesos, especialidad mecánica, especialidad electrónica instrumentación, especialidad eléctrica e ingeniería de sistemas, entre otras.

La unidad de mezclado y destilación se compone en forma general de los siguientes componentes principales (René Wilfredo Jimenez Morale, Octubre De 2009.).

- ✓ Componentes mecánicos
- ✓ Componentes de instrumentación y control
- ✓ Componentes eléctricos y cableado
- ✓ Componentes de Hardware y software

Las especificaciones generales de diseño de la unidad, se resumen a continuación.

- Columna destilación binaria para proceso Batch, para Agua y Etanol
- Destilación a presión atmosférica
- Columna de 10 platos reales
- Columna Diámetro 70mm
- Longitud Columna 1000mm
- Capacidad alimentación boiler 44 litros
- Tanques producto cantidad 2, con capacidad de 22 litros
- Tanque almacenamiento o carga de 44 litros
- Recipiente de interface capacidad de 2,5 litros
- Sistema de refrigeración tanque interface
- Material de boiler y columna en acero inoxidable SS 316
- Material de líneas de proceso en acero inoxidable SS 316
- Válvulas de control con actuador eléctrico on/off
- Válvula de tres vías con actuador eléctrico
- Relación de reflujo 0 - 100%
- Sensores de temperatura tipo RTD Pt 100 (0°C a 350 °C)
- Sensores de presión de 0 – 25 psi
- Válvula de seguridad set 14.7 psi
- Sensores de nivel (0 - 100%)
- Sensor de presión diferencia 0 - 100 inH<sub>2</sub>O
- Sistema de calentamiento potencia requerida de 8.5KW
- Sistema de control autónomo

#### Interconexiones

- Suministro eléctrico 220V, 60HZ, 3 fases
- Sistema de refrigeración (Chiller) 110 VAC
- Bomba dosificadora 110 VAC
- Variador de velocidad

## Sistema de control

El sistema de control es basa en tecnología PLC y gobierna en forma general la operación de la unidad, se encarga además del procesamiento de toda la información de los sensores de campo, válvulas de control, apagado y encendido de resistencias motores, activación de relés y almacenamiento en tiempo real de la data generada durante las pruebas.

PLC, Basado en tecnología Allen bradley Rockwell Automation con software RSlogix5000 pro.

En el anexo A, se adjunta los planos de diseño desarrollados en Solidworks y PDF

## 2.4 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA

La unidad diseñada como se ha señalado anteriormente, permite el fraccionamiento y caracterización de compuestos mediante cortes de temperatura o volumen de fracciones de mezclas de agua y etanol con puntos de ebullición cercanos a 80°C.

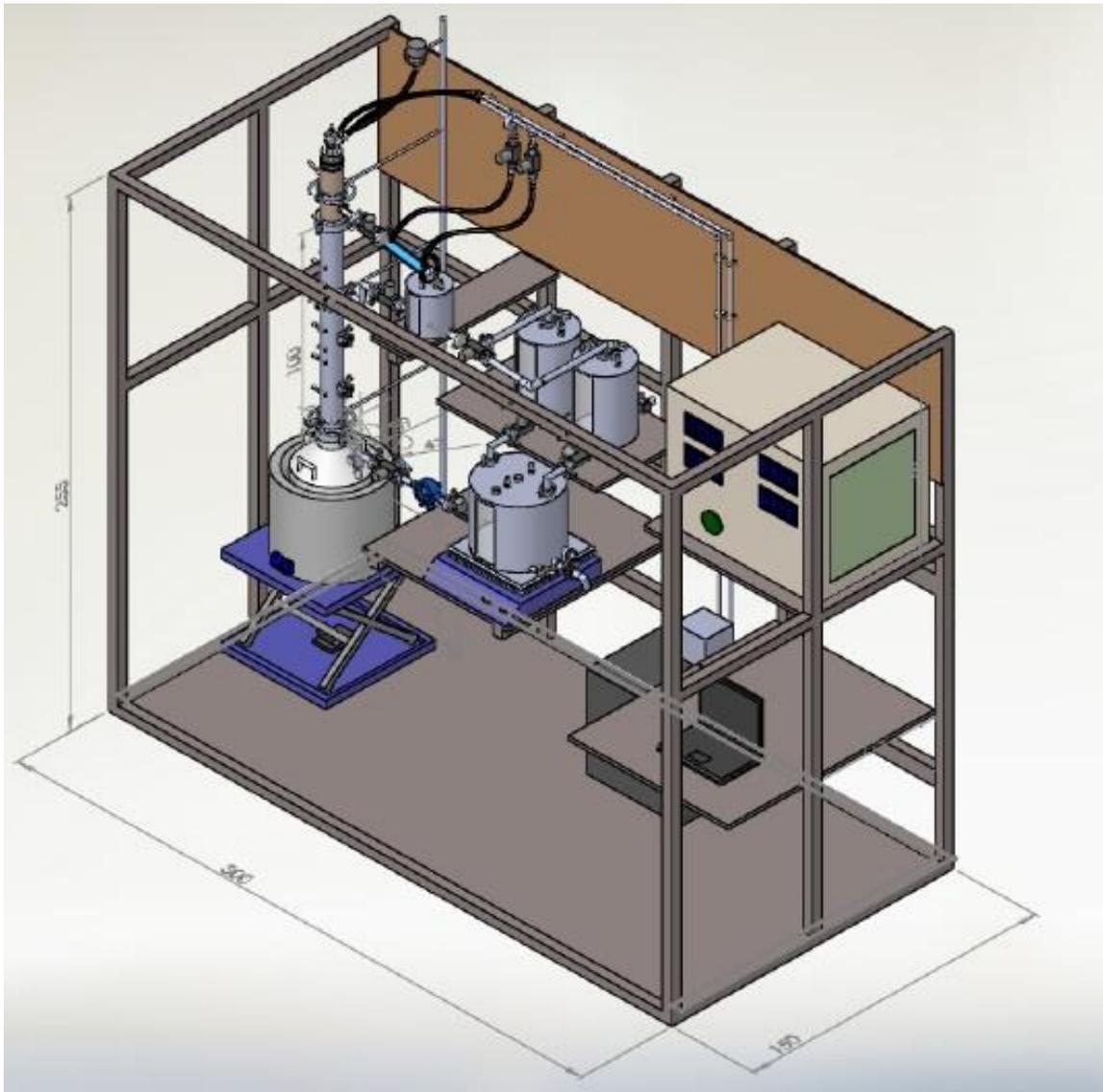
La destilación de agua y etanol en un proceso Batch, parte de una carga que es calentada en el boiler, la cual es sometida a incrementos de temperatura hasta generar vapores que ascienden por la columna, éstos vapores son condensados en la parte superior de la columna gracias al intercambio de temperatura generado en el condensador de cima. El condensado es posteriormente recolectado en su orden de acuerdo a sus pesos y volatilidades en los dos recipientes de producto, separando primero los elementos más livianos hasta los de mayor peso. El esquema de la planta se muestra en la Figura 10 que corresponde al diseño de la planta de destilación (Anton A. Kiss a, October 2014).

La unidad se compone de cinco zonas principales:

1. Zona de calentamiento o ebullición.
2. Zona de torre destilación y reflujo.
3. Zona de condensación.
4. Zona de recolección y producto.
5. Zona de almacenamiento y carga.

El sistema se basa en un diseño modular con arquitectura abierta y ergonómica lo cual brinda gran flexibilidad y una fácil operación

Figura 10. Diseño Planta Destilación



Fuente: Autor

#### 2.4.1 Zona de calentamiento o ebullición

El boiler es la parte principal de esta zona y es donde se realiza el proceso de calentamiento de la carga, para generar vapores que luego fluyen a la torre de destilación. Este es un recipiente cilíndrico con capacidad máxima en volumen de 44 litros y facilidades ergónomas para fácil mantenimiento y maniobra, fabricado en acero inoxidable.

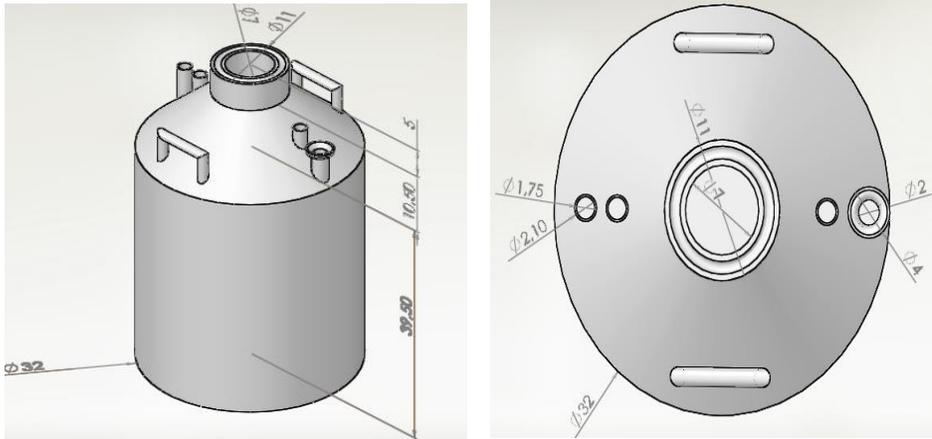
Los elementos principales que conforma esta zona son:

- Boiler de 44 litros
- Sistema de resistencia de calentamiento distribuido simétricamente

- Mesa de nivelación móvil flexible
- Facilidades para instalación de sensores de presión diferencia
- Facilidades para instalación de sensores de temperatura (RTD Pt 100)
- Facilidades para instalación de instrumentación (nivel y presión)
- Facilidades para cargue de producto a través de bomba peristáltica y/o directamente por la parte superior del recipiente o boiler
- Serpentín de enfriamiento con aire en el boiler.

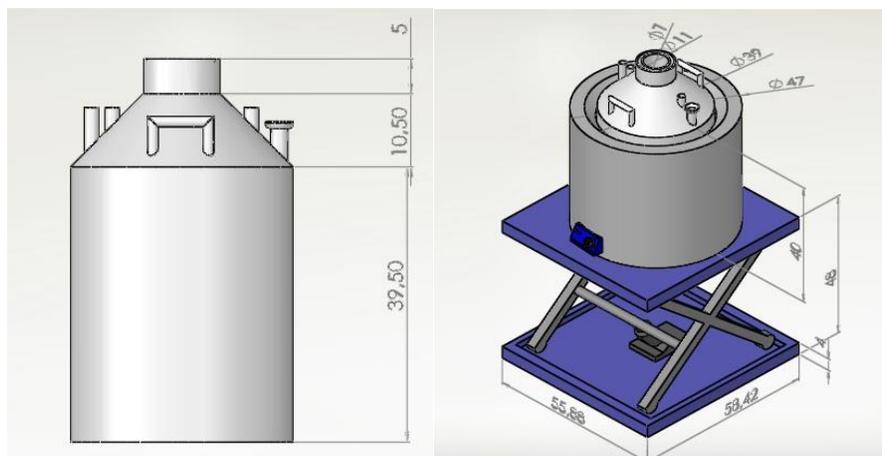
El boiler es fabricado en acero inoxidable (SS) y cuenta con facilidades para instalación de los instrumentos de medición supervisión y control requeridos durante la operación, los cuales son sensores de temperatura, sensores presión y sensores de nivel entre otros. Además, el sistema cuenta con un serpentín de enfriamiento para la inyección de aire el cual permite agilizar proceso de enfriamiento del boiler, como se muestra en la Figura 11 y 12 que corresponden a la zona de calentamiento o ebullición.

Figura 11. Vistas Lateral y Superior Boiler



Fuente: Autor

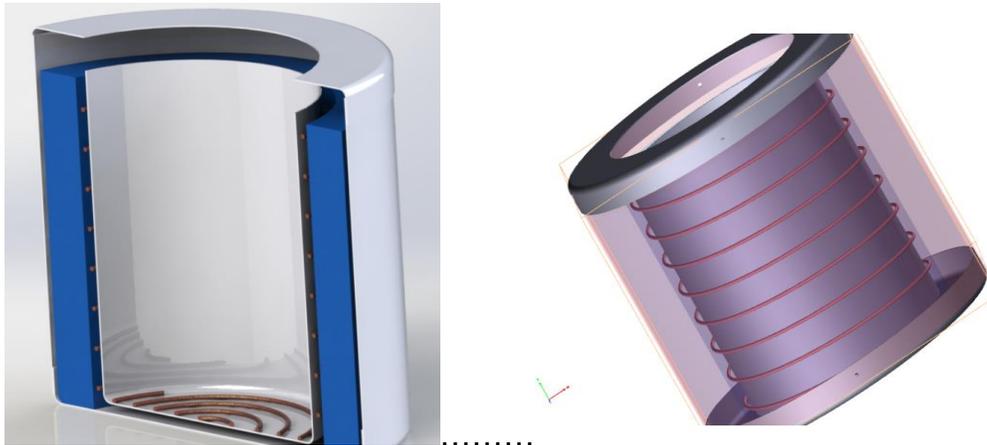
Figura 12. Zona de Calentamiento Dimensiones



Fuente: Autor

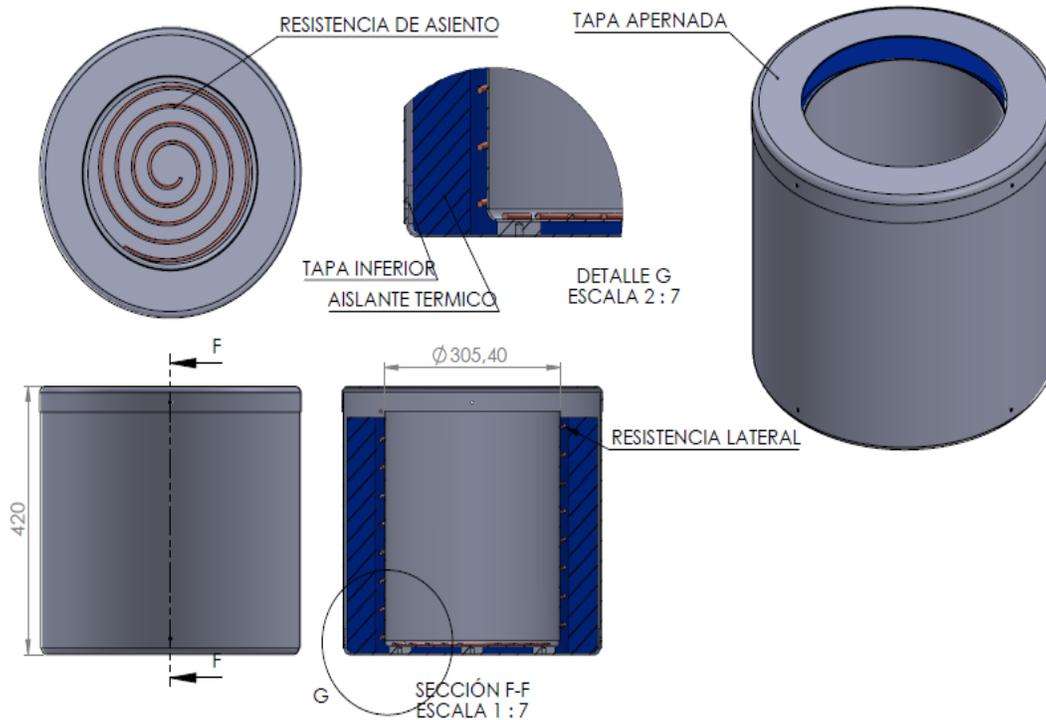
El sistema de calentamiento está conformado por un arreglo de resistencias eléctricas distribuidas simétricamente de la tal forma que pueda garantizar un calentamiento uniforme de la carga, estas resistencias se alimentan con un voltaje de 220 VAC, 60Hz y con potencia aproximada de 8.5 KW. Su funcionamiento y control se realiza mediante rampas de calentamiento programadas desde el PLC, permitiendo alcanzar las temperaturas requeridas para la destilación. En la figura 13, y figura 14 se muestra el diseño del arreglo de las resistencias.

Figura 13. Vista Sistema de Aislamiento y Resistencia



Fuente: Autor

Figura 14. Secciones del diseño unidad de calentamiento



Fuente: Autor

## 2.4.2 Zona destilación y reflujo

La zona de la torre de destilación está conformada por una columna de 100 cm de longitud y 7 cm de diámetro la cual tiene como función principal la separación de las diferentes fracciones de componentes producto de la destilación. En esta área se determina el reflujo de vapores condensados, y se establece el equilibrio líquido vapor aspecto muy importante para una eficiente separación de componentes.

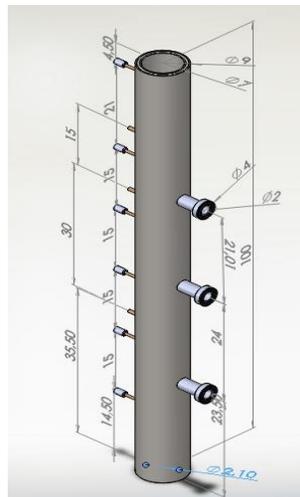
La zona está conformada por:

- Una columna en acero inoxidable (SS 316), Con altura de 1000 mm y diámetro interno 70 mm:
- Platos o Bandejas (distribución de 10 platos)
- Sensores de temperatura tipo RTDs PT 100. Encargados de la medición del perfil de temperatura de las diferentes zonas de las torres de destilación. (diámetro sensor de 1/8")
- Facilidades para medición de perfil de temperatura (seis en total, conector macho NPT, conexión a proceso y con conector 1/8 OD roscado macho)
- Facilidades para entrada de producto 3/4"
- Línea facilidades para reflujo 3/4"

El arreglo cuenta con facilidades para inyección de carga en diferentes niveles de platos de entrada, es importante señalar que cada modificación en la entrada de flujo a la torre, altera la dinámica de operación de la columna.

Las dimensiones y características generales del diseño se muestran en la figura 15 que corresponde a la vista lateral de la torre destilación.

Figura 15. Vista lateral Torre destilación



Fuente: Autor

Internamente la columna está compuesta por un arreglo de bandejas o platos perforados debidamente espaciados, cada plato tiene un diámetro de 70 mm, el

sistema cuenta con un eje central de soporte para los platos como se muestra en la figura 16 Arreglo de Platos

Figura 16. Arreglo de Platos



Fuente: Autor

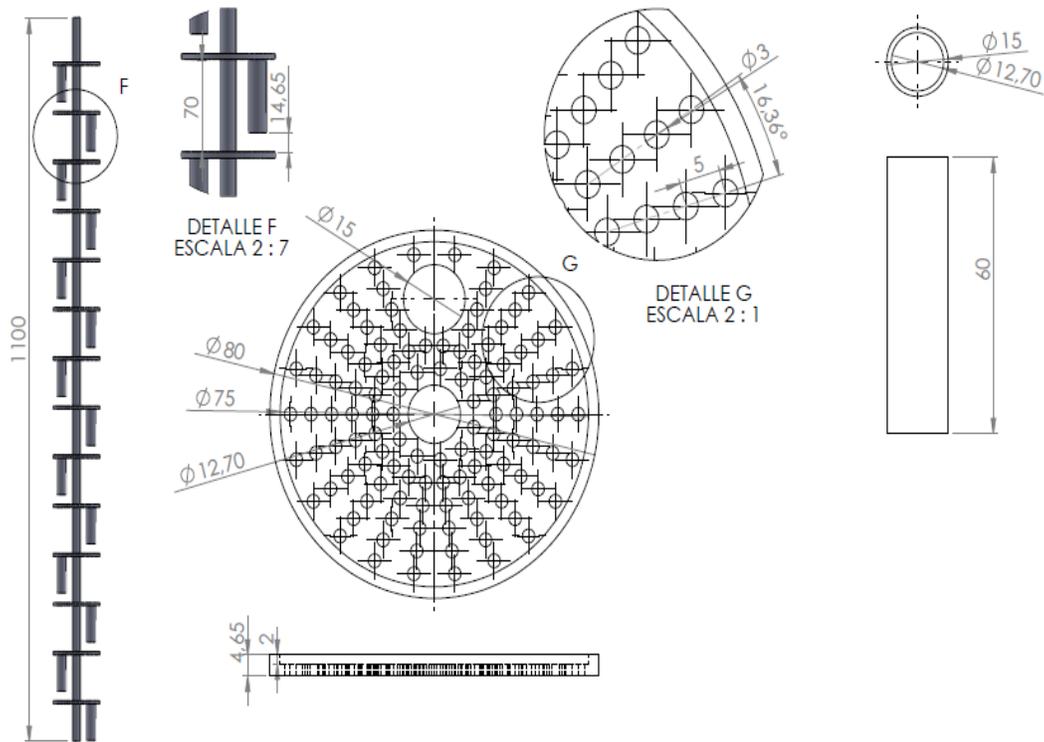
El diseño del plato perforado está conformado por líneas de pequeñas agujeros o ranuras en la bandeja con un diámetro aproximado de 3mm y un tubo bajante de 60 mm de longitud y diámetro de 1 ½ cm, como se muestra en la figura 17, y 18 que son las figuras de los platos perforados

Figura 17. Platos Perforado



Fuente: Autor

Figura 18. Secciones del diseño arreglo de platos



Fuente: Autor.

Los platos hacen sello con las paredes laterales de la columna asegurando su hermeticidad, para que el vapor y reflujo fluyan a través de las perforaciones de los platos, la función del eje central es dar soporte a los platos y permitir retirar el arreglo de platos para fácil mantenimiento y servicio.

Algunas consideraciones y aspectos importantes a tener en cuenta durante el proceso de destilación que ya fueron definidos completamente son:

- ✓ Presión de vapor
- ✓ Temperatura de saturación
- ✓ Temperatura de burbuja o punto inicial de ebullición
- ✓ Presión de rocío
- ✓ Plato de destilación
- ✓ Un azeótropo (o mezcla azeotrópica)

### 2.4.3 Zona de condensación

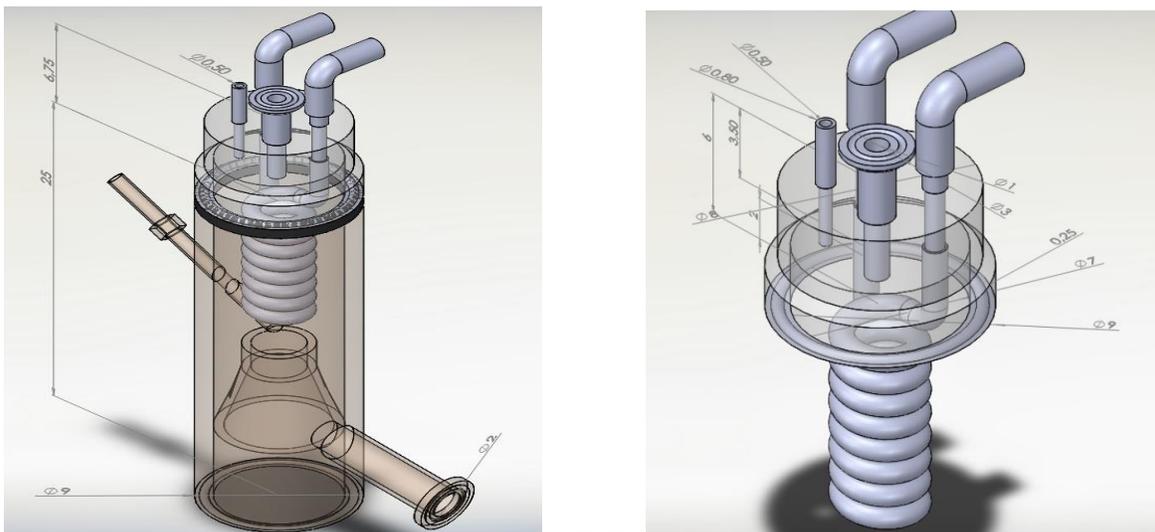
La zona de condensación está ubicada en la parte superior de la columna y está compuesta de un serpentín en acero inoxidable (SS) de 25 centímetros de longitud

aproximadamente y un cono invertido para facilitar la recolección de los vapores condensados. A través del serpentín se re-circula un líquido refrigerante a temperatura inferior a los vapores de destilación el cual proviene de la unidad de refrigeración (chiller). Esta unidad de refrigeración cuenta con facilidad para su programación a diferentes rangos de temperaturas, (entre -20 °C y 50 °C) permitiendo de esta manera el control y manejo de diferentes puntos de corte. Los cambios de temperatura, generan la condensación de vapores en la zona alta de la columna precipitando gotas líquidas en la cima de la torre, dicho condensado es recolectado a través del cono invertido y enviado al tanque de separación de interface a través de una tubería de ¾ de pulgadas en acero inoxidable y una válvula de control On/Off ubicada en la línea a salida de la zona de condensación.

La zona de condensación tiene facilidades para medición de temperatura, presión, presión diferencial e instalación de una válvula de seguridad o alivio. Además, cuenta con un arreglo de mangueras que permite llevar el líquido refrigerante al condensador y tanque de interface.

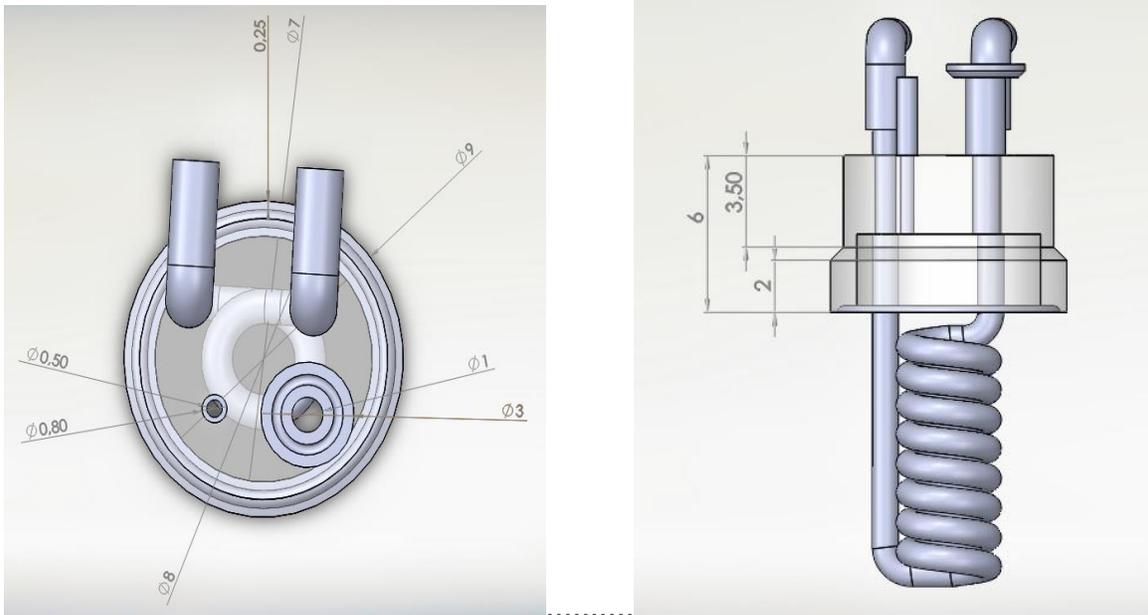
La unidad de refrigeración es un sistema compacto que opera a 220 VAC, 60Hz de potencia 2.0 KW, la cual puede ser programado a diferentes temperaturas según como lo requiera el proceso. La Figura 19 y 20 muestra el serpentín y condensador de la torre.

Figura 19. Vista isométrica de serpentín condensador



Fuente: Autor.

Figura 20. Vista superior y lateral del serpentín



Fuente: Autor.

#### 2.4.4 Zona de recolección y producto

La zona de producto está conformada por un arreglo de líneas de proceso y dos tanques de capacidad de 22 litros cada uno, en los cuales se recibe el destilado proveniente de la torre a mediante el accionamiento de las válvulas on/off y de una válvula de tres vías, la cual permite seleccionar el tanque producto a utilizar.

El sistema cuenta además con un tanque de separación de fase de 2,5 litros de capacidad, el cual almacena el destilado antes de pasar a los tanques de producto y a través de una facilidad de líneas de servicio puede recircular producto condensado nuevamente a la columna, el reflujo a la torre se controla mediante una válvula on/off la cual es gobernada desde el PLC de la unidad.

El arreglo de los dos tanques de producto permite separar diferentes composiciones o calidades de productos en cada uno de ellos, dependiendo de los cortes de temperatura programados desde el sistema de control (PLC Allen-Bradley) de la unidad. Los tanques de producto se seleccionan desde el sistema de control mediante el accionamiento de la válvula de tres vías y su acción es sincronizada en el PLC, dependiendo de los cortes predefinidos de temperatura. Los tanques cuentan además con facilidades para medición de nivel, medición presión, medición temperatura y sensores multipropósito, dependiendo de las pruebas que se deseen realiza.

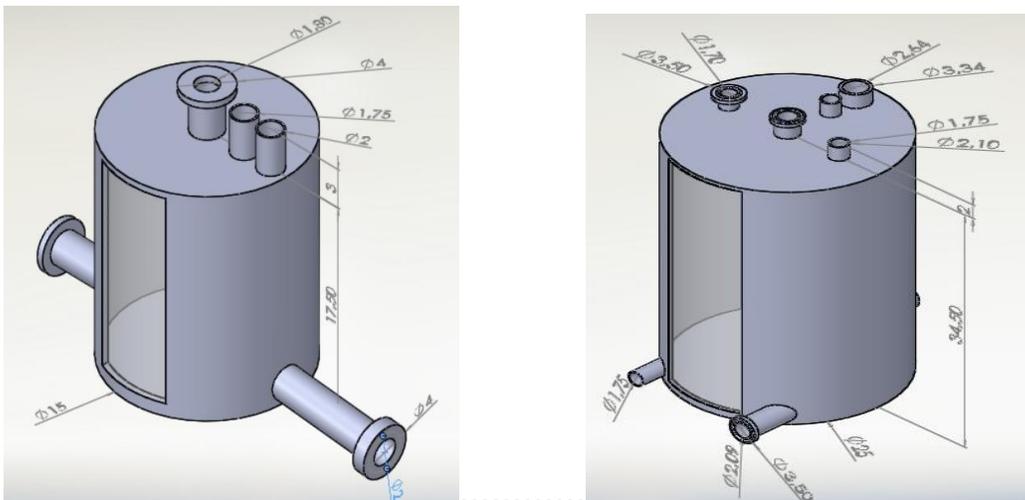
El sistema permite indicar en tiempo real, el volumen condensado y la relación de volumen destilado respecto al volumen total de carga, permitiendo también operar el sistema ya sea por cortes de temperatura o por volumen generado.

Los principales elementos que conforman la zona de productos se mencionan a continuación:

- Líneas de  $\frac{3}{4}$ " en acero 316 ss. que permiten el flujo de destilado del condensador al tanque de interface y tanques producto, a través de las válvulas on/off y válvulas de tres vías respectivamente
- Sensores de nivel de los tanques de interface y producto
- Facilidad para medición de temperatura
- Tanque de interface con capacidad de 2,5 litros acero 316 ss., con mirilla frontal y sistema de refrigeración independiente
- Tanques de producto en acero 316 ss., de capacidad de 22 litros cada uno con mirilla frontal
- Válvulas de tres vías para selección de tanque de producto
- Manguera de recirculación de líquido refrigerante hacia tanque de interface
- Sensores de temperatura tipo RTDs Pt 100, en cada uno de los tanques
- Facilidad para instalación de sensores de presión en cada uno de los tanques
- Facilidad para instalación de sensores multipropósito en cada uno de los tanques
- Válvulas de drenaje para mantenimiento

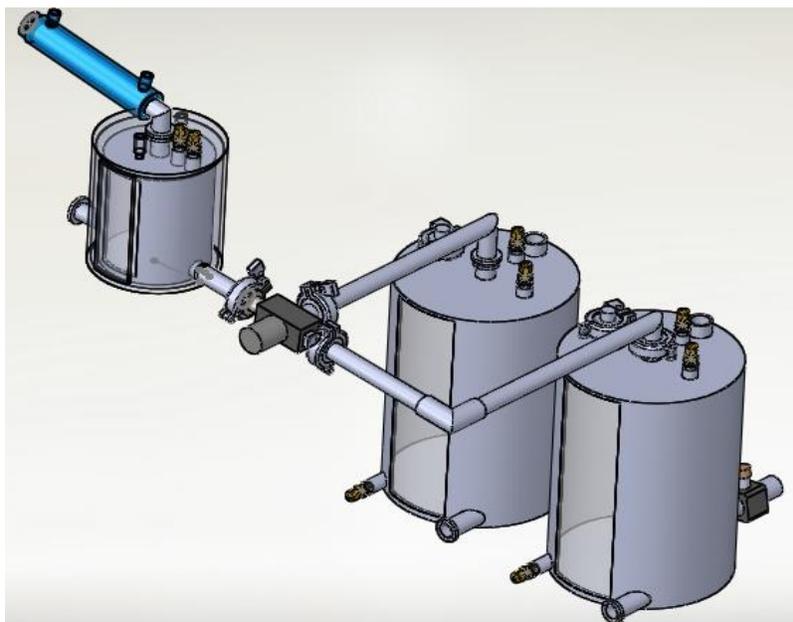
En la figura 21 y 22 se muestra el arreglo para cada uno de los tanques que conforma esta parte de la planta.

Figura 21. Tanque isométrico de interface y producto



Fuente: Autor.

Figura 22. Tanque interface y producto



Fuente: Autor.

#### 2.4.5 Zona de almacenamiento y carga

La zona de carga está conformada por un recipiente en acero 316 ss. de capacidad 44 litros. El cual tiene como función almacenar el material a destilar permitiendo la carga y descarga de producto previo al proceso de destilación. Este recipiente se comunica con el boiler y columna de destilación a través de un arreglo de tuberías de  $\frac{3}{4}$ " y una bomba dosificadora peristáltica configurada con variador de velocidad que permite el control de la rata de carga de flujo hacia la torre y/o boiler.

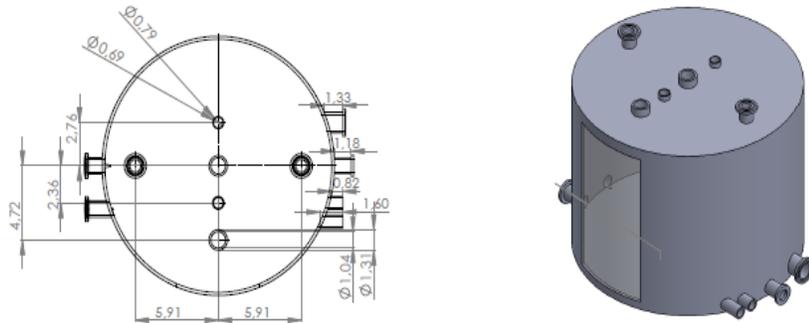
La dirección del flujo es controlada mediante el accionamiento de válvulas on/off operadas desde el sistema de control. Además, éste tanque esta comunicado con los tanques de la zona de recolección de producto, tanque 1 y tanque 2 mediante arreglo de válvulas que puede controlar su alineación durante los procesos de mezclado o blending. También el sistema cuenta con facilidades para la instalación de un agitador magnético en la parte inferior del tanque, medición de nivel, medición presión, medición temperatura y sensores multipropósito.

El sistema de carga consta de las siguientes partes:

- Tanque en acero 316 ss. de capacidad de 44 litros
- Facilidad para medición de temperatura tipo RTD Pt 100, para monitoreo de temperatura de la carga.
- Facilidad para sensores de nivel, censa la variable de nivel de la carga.
- Facilidad para medición de presión

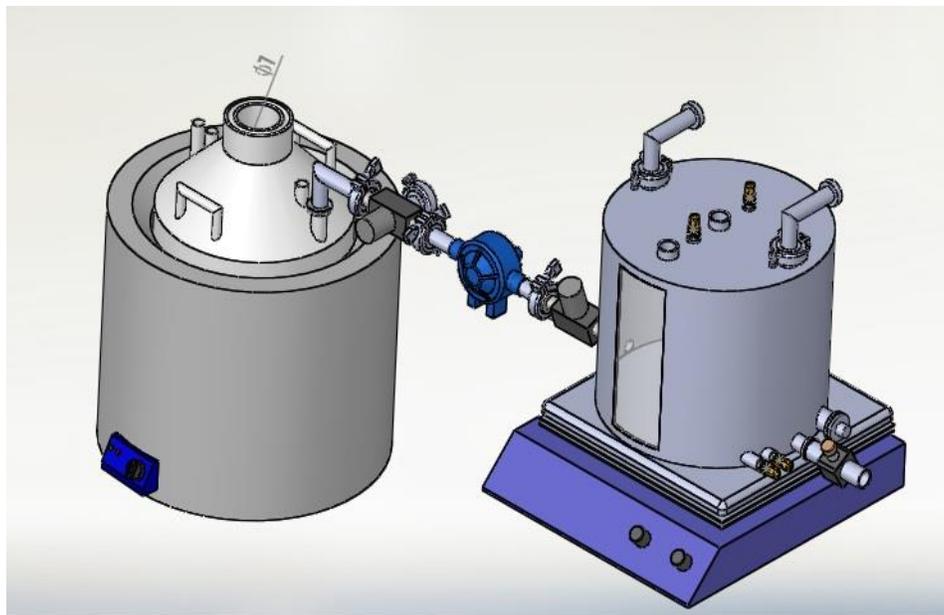
- Facilidades multipropósito para instalar instrumentación
- Bomba de carga dosificadora peristáltica
- Válvulas de control on/off para control de carga a torre y/o boiler.
- Válvulas de drenaje de tanques.

En la figura 23 y 24, se muestra el arreglo de la zona de carga  
 Figura 23. Tanque de carga



Fuente: Autor

Figura 24. Zona de carga



Fuente: Autor

#### **2.4.6 Selección instrumentación, actuadores y sistema de control.**

Durante el diseño se evaluaron diferentes alternativas para la selección del hardware e instrumentos de la planta entre los parámetros considerados en la selección se tienen los costos de la tecnología, la modularidad, la base instalada en la UPB, facilidad de repuestos, representación nacional y/o local de los productos, madurez de la solución, entre otros aspectos. En la definición del sistema de control se revisaron cuatro alternativas con diferentes proveedores los cuales se menciona a continuación:

- ✓ National instrumen: Aplicación en Labview.
- ✓ Schneider Electric: Aplicación MÓDICON PAC M580.
- ✓ Schneider Electric: Aplicación con procesador FCP280 FOXBORO EVO.
- ✓ Melexa Allen Bradley: Aplicación PLC CompactLogix y ControlLogix.

Resultado del análisis realizado entre las alternativas recibidas se definió junto con el director de proyecto como mejor opción la tecnología de Allen Bradley basada en PLC ControlLogix dado su robustez, versatilidad, base instalada en la UPB, fácil consecución de repuestos y representación local de servicios.

#### **2.4.7 Sistema de control**

El sistema corresponde a un PLC ControlLogix high capacity 2MB controller de Allen Bradley, con un chasis de 10 slot disponible para los módulos de entrada y salida (I/Os), la cantidad de módulos corresponden según el listado de señales de la instrumentación definida para la planta. La función del PLC es gobernar en forma general la operación de la unidad y es el encargado del procesamiento de toda la información de los sensores de campo, además del accionamiento de válvulas de control, el apagado y encendido de resistencias de calentamiento, almacenamiento en tiempo real de la información generada durante las pruebas. Permite la generación de tendencia, graficar variables, desarrollo de reportes y en forma general mantener disponible la información para su posterior evaluación y análisis.

La selección de este PLC se realizó ubicando un dispositivo de alta gama del mercado, el cual ofrece la posibilidad de una expansión ya que este PLC permite comunicación con otros dispositivos para conformar una red desde donde se pueda centralizar información de supervisión y control.

La descripción detallada del hardware y módulos seleccionados para este proyecto se menciona en la tabla 4.

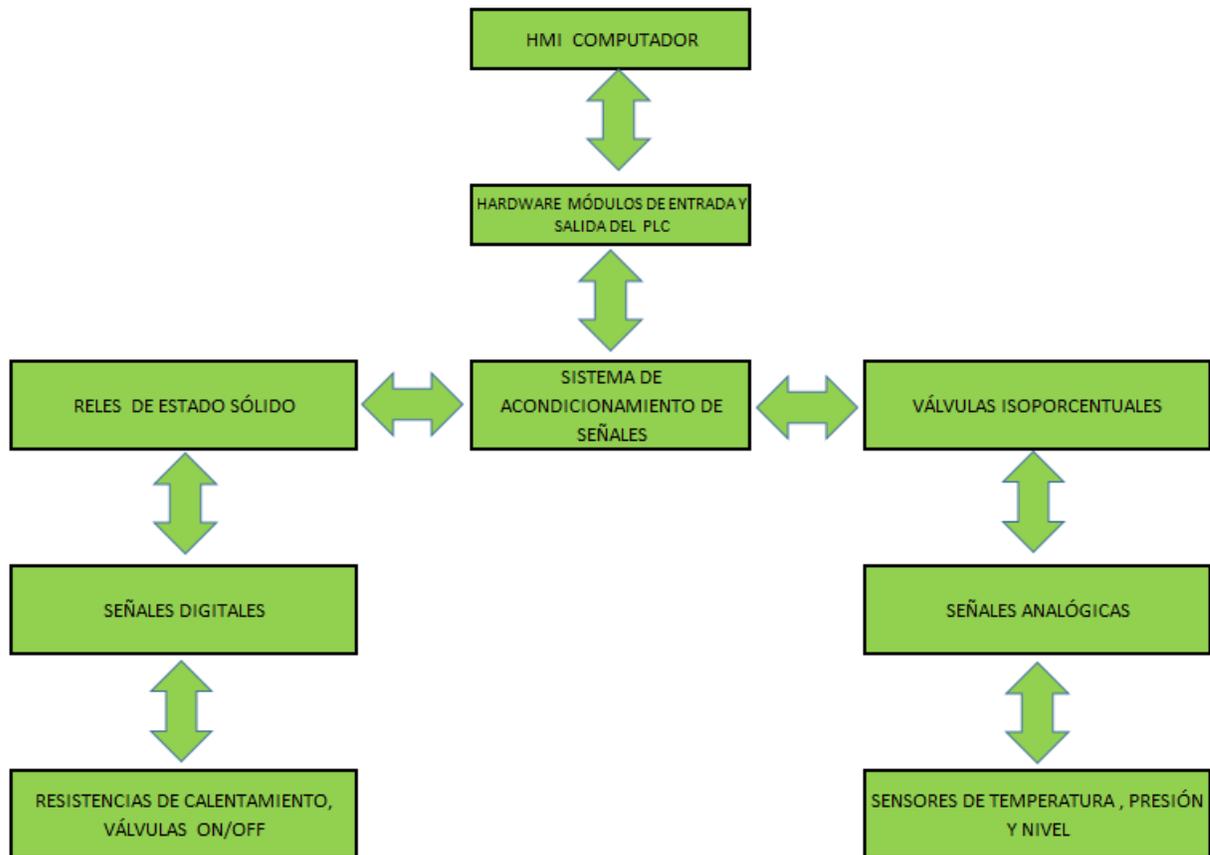
Tabla 4. Hardware seleccionado.

items	Referencia	Descripción de la referencia	Marca
1	1756-A10	CHASIS CONTROLLOGIX 10 SLOT	ALLEN BRADLEY
2	1756-PA75	FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA CONTROLLOGIX A 110/220 VCA (13A@5V)	ALLEN BRADLEY
3	1756-L71	ControlLogix 2 MB Controller	ALLEN BRADLEY
4	1756-EN2T	CONTROLLOGIX HIGH CAPACITY ETHERNET/IP MODULE - TP	ALLEN BRADLEY
5	1756-IB32	MODULO DE 32 E. A 24 VCC (36 PINES)	ALLEN BRADLEY
6	1756-OB32	MODULO DE 32 S. A 24 VCC (36 PINES)	ALLEN BRADLEY
7	1756-IF16	MODULO DE 16 E. ANALÓGICAS DE CORRIENTE O VOLTAJE (36 PINES)	ALLEN BRADLEY
8	1756-IF8	MODULO DE 8 E. ANALÓGICAS DE CORRIENTE O VOLTAJE (36 PINES)	ALLEN BRADLEY
9	1756-OF8	MODULO DE 8 S. ANALÓGICAS DE CORRIENTE O VOLTAJE (20 PINES)	ALLEN BRADLEY
10	1756-TBNH	BLOQUE DE TERMINALES DE 20 PINES CON SUJECCIÓN POR TORNILLOS	ALLEN BRADLEY
11	1756-N2	CARTA DE RELLENO DE SLOT VACÍO	ALLEN BRADLEY
12	* 1492-ACABLE010TD	Pre-wired Cable for 1756-IF8 (Diff. current) Analog Input Module, 5 twisted-pair conductors, #22 AWG, shielded, w/1756-TBCH connector & AIFM 25-Pin D-shell connector, length 1.0 meter (3.28 feet)	ALLEN BRADLEY
13	* 1492-ACABLE010WB	Pre-wired Cable for 1756-OF8 (Current) or 1756-OF8H (Current/Hart) Analog Output Module, 9 twisted-pair conductors, #22 AWG, shielded, w/1756-TBNH connector & AIFM 25-Pin D-shell connector, length 1.0 meter (3.28 feet)	ALLEN BRADLEY
14	* 1756-IRT8I	RTD / Ohms / Thermocouple / mV Input Module, 8 Individually Configurable Isolated Points (36 Pin)	ALLEN BRADLEY
15	1492-IFM40F	40-Point Feed-Through Digital IFM, Standard	ALLEN BRADLEY
16	1492-CABLE010Z	Pre-wired cable for 1756 32-pt I/O Modules, 40 conductors, #22 AWG, w/1756-TBCH connector & IFM 40-pin connector, length 1.0 meter (3.28 feet)	ALLEN BRADLEY
17	* 1492-AIFM8S-3	Analog Cable Connection Products	ALLEN BRADLEY
18	1492-ACABLE010YF	Feed-Through 8 Channel Analog IFM, 3 Terminals per Input	ALLEN BRADLEY
19	1492-AIFM8-3	BLOQUE DE TERMINALES DE 36 PINES CON SUJECCIÓN POR TORNILLOS	ALLEN BRADLEY
20	1756-TBCH	BLOQUE DE TERMINALES DE 36 PINES CON SUJECCIÓN POR TORNILLOS	ALLEN BRADLEY

Fuente: Autor

La estructura general del sistema de control definida para esta aplicación se muestra en el diagrama de bloques de la figura 25.

Figura 25. Diagrama de bloques de sistema de control



Fuente: Autor

El Hardware instalado controla todas las funciones de la unidad de destilación, según la programación implementada, el cual recibe de campo la información de los diferentes sensores y elementos instalados y realiza la supervisión y control del proceso. El Software supervisor cumple su función de controlar el hardware y contiene las estrategias de control, base de datos y algoritmos especiales de cálculo que regulan el desempeño de la unidad. Además, presenta la interface de operación con el usuario (HMI) y permitir en forma general, el seguimiento, monitoreo y control de la unidad de destilación y Mezclado (Zhao Lei, ( 2 0 1 3 ) 819–830).

## 2.5 INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIDAD DE DESTILACIÓN

A nivel de instrumentación, la planta dispone de diferentes tipos de sensores cada uno con una función específica y clave dentro del proceso. Cuenta con aproximadamente 54 señales de los diferentes sensores de temperatura, presión, nivel, presión diferencia, sensores capacitivos, válvulas eléctricas y neumáticas entre otros. Las principales variables y elementos de proceso se resumen a continuación:

- Temperatura RTDs Pt 100
- Sensor de presión diferencial
- Sensor de presión
- Sensores capacitivos
- Medidores de nivel
- Válvulas control on/off
- Válvula de tres vías
- Válvulas proporcionales
- Actuadores eléctricos

De acuerdo a las variables se definen la cantidad de módulos y canales de entrada y salida requeridos en el PLC, para su programación y configuración. Las cuales se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5. Señales I/Os

Planta Destilación	
Cantidad	Señales
15	Input Análogas 4-20 mA/ 0- 5 voltios
5	Output Análogas 4-20 mA/ 0- 5 voltios
5	Señales Digitales Input
15	Señales Digital Output
14	Input RTD Pt 100

Fuente: Autor

La función de las RTD, es la medición y seguimiento de temperatura en puntos clave de la unidad, en este caso se utilizan sensores resistivos tipo Pt 100, debido al rango de trabajo al que van a estar sometidos, su ubicación y longitud dependen del servicio que prestan dentro de la planta, ya sea para control de temperatura de calentamiento del boiler, seguimiento de perfil de temperatura de la columna, control de temperatura en la cima de la torre, temperatura del condensador y/o medición en los tanques.

La medición de nivel se realiza con sensores ultrasónicos UB500 P+F, con salida de comunicación 4-20 mA, utilizados para la medición de nivel de los recipientes de la planta.

Para la detección de la primera gota se utiliza un sensor tipo capacitivo CJ30-50K10-E0123-Y46139, el cual genera una señal digital de estado, que indica abierto/cerrado al detectar la presencia de líquido instalado en la línea a la salida del condensador.

La planta cuenta además con un sensor diferencial de presión de diafragma de 0 a 64 inH<sub>2</sub>O para medir el delta de presión entre el boiler y la cima de la torre de destilación y una válvula de seguridad o alivio de presión con set de disparo 14.7 psi. También se cuenta con sensores de presión de 1000 Torr y 4000 Torr respectivamente para medición de presión en boiler y columna.

La instrumentación es seleccionada de acuerdo a las características del proceso dimensiones del diseño, tipo conexiones a proceso, diámetros y característica de cada componente. El listado general se resume en la tabla 6.

Tabla 6. Instrumentación de la planta

CANT	ELEMENTO	DIAMETRO	CONEXIÓN	MATERIAL	UBICACIÓN	Input	Output
1	VALVULA DE ALIVIO O SEGURIDAD ,MODULADA: 14.7 PSI	3/4"	NPT	SS 316	Parte superior columna	4-20 mA	
4	TRASMISOR DE NIVEL ULTRASONICO SIN CONTACTO /INTERVALO DE MEDIDA (0,- 80 cm) para líquidos/4-20 mAmp /Temp Fluido: -20 a 80 °C	1"	NPT	INTERNOS , INOX	Tk2, Tk3, Tk 4 y Boiler	4-20 mA	
1	TRASMISOR DE NIVEL ULTRASONICO SIN /INTERVALO DE MEDIDA (0- a 50 cm) para líquidos/4-20 mAmp / Hart - 2 Hilos /Temp Fluido: -20 a 80 °C	1"	NPT	INTERNOS , INOX	Tk1 ( Tanque de interf	4-20 mA	
4	Sensor de presión de 4000 Torr	1/2"	NPT	INTERNOS , INOX	Presión en tanques.	4-20 mA	
1	Sensor de presión de 1000 Torr	1/2"	NPT	INTERNOS , INOX	Presión columna destilación	4-20 mA	
3	VALVULA DE CONTROL ISOPORCENTUAL /ACTUADOR NEUMATICO/POSICIONADOR NEUMATICO 4-20 mAmp// Opción actuador eléctrico	3/4"	Proceso	INOX	Control salida flujo Tk 2 Control salida flujo Tk3 Control salida flujo Tk4		4-20 mA
4	VALVULA ON/OFF/ACTUADOR NEUMATICO //Opción actuador eléctrico	3/4"	Proceso	INOX	Salida Tk 4 Entrada a boiler y torre		ON/OFF
4	VALVULA DE BOLA ON/OFF / MANUAL	3/4"	NPT	INOX	Drenaje de los 4 Tanques		ON/OFF
2	VALVULA ON/OFF / ACONTROL REFRIGERANTE A CONDENSADOR //Opción actuador eléctrico	1/2"	NPT	INOX	Control Flujo a condensador		ON/OFF
2	VALVULA PARA CONTROL AIRE A BIOLER //Opción actuador eléctrico	1/2"	NPT	INOX	Control línea de aire a Boiler		ON/OFF
10	Sensores RTD PT 100 de cuatro hilos , perfil temperatura torre longitud aprox 10 cm	1/8"	ROSCA AL PROCESO DE 1/4" NPT - Terminales en teflón de 5mt	INOX	Perfil temperatura columna	RTD	
1	Sensores RTD PT 100 de cuatro hilos , perfil temperatura torre longitud aprox 50 cm	1/8"	ROSCA AL PROCESO DE 1/4" NPT - Terminales en teflón de 5mt	SS 316	Temperatura Boiler	RTD	
3	Sensores RTD PT 100 de cuatro hilos , perfil temperatura torre longitud aprox 15cm	1/8"	ROSCA AL PROCESO DE 1/4" NPT - Terminales en teflón de 5mt	SS 316	Temperatura Tks	RTD	
1	Sensor óptico ( detección de primera gota de condensador)		Proceso	SS 316	Línea salida de condensador	Digital	
1	Electroválvula de tres vías on/off, ACTUADOR NEUMATICO//Opción actuador eléctrico	Instalar en línea de 3/4"	Proceso	SS 316	línea de condesado salida de Condensador	Digital	
1	Sensor de Densidad ( Agua Etanol)	1"				4-20 ma	
1	Unidad de Mantenimiento AIRE INSTRUMENTOS						
1	Fuente DC 5 Amperios 24 VDC						
3	Tubo acero 1/4"						
16	Racor NPT (1/4") macho OD (1/8")						
1	BOMBA LABORATORIO DE BAJO FLUJO					4-20 mA	
24	Racor NPT (3/4") macho OD (1/4")						

Fuente: Autor

## 2.6 ENSAMBLE DE LA UNIDAD DE DESTILACION Y MEZCLADO

### 2.6.1 Ensamble de la estructura mecánica

La unidad de destilación y mezclado es ensamblada por secciones, inicialmente se fabrican los elementos mecánicos mayores de acuerdo al diseño, al igual que la estructura metálica plataforma y soporte principales. Luego se integran los demás elementos junto con la instrumentación y conexasión eléctrica.

La primera zona que se arma corresponde al boiler y sistema de resistencias de calentamiento junto con la sección de la columna, posteriormente se integra la zona de condensación con su conexión a chiller y tubería de proceso que interconectan los tanques de interface, producto y carga. En esta etapa de ensamble se instalan todas las válvulas y demás elementos en general como se muestra en la figura 26.

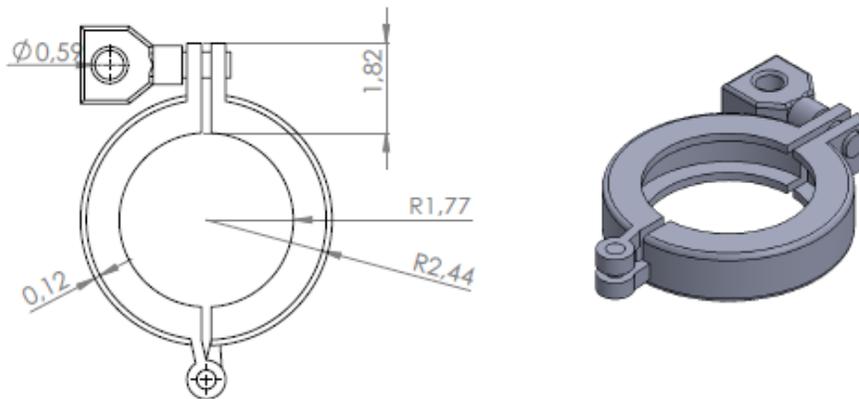
Figura 26. Estructura y montaje de la planta



Fuente: Autor

Dada su modularidad la unidad dispone de sistema de acoplamiento rápido para unión de tuberías de acero y entre tanque y boiler lo que facilita las labores de limpieza y mantenimiento como se muestra en la figura 27.

Figura 27. Sistema de acoplamiento rápido



Fuente: Autor

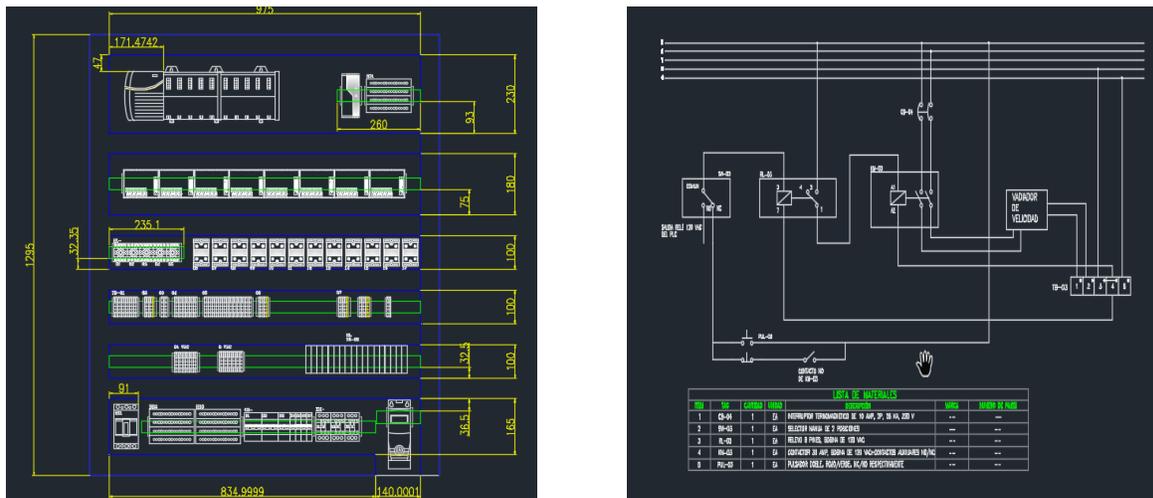
## 2.6.2 Conexión eléctrica

Una vez armada la parte mecánica, se avanza con la distribución y conexión del sistema eléctrico y cableado de la instrumentación. Para lo cual se realiza una definición del trazado y conexión de los circuitos principales de alimentación de potencia y de cableado de instrumentación. También se definen las dimensiones del gabinete de potencia, de acuerdo a la distribución más óptimas, el tipo y características del cable a utilizar para la instrumentación y potencia, protecciones entre otros aspectos. En esta etapa se contempla en forma general lo siguiente:

- ✓ Tipo de Gabinete de potencia y características del mismo, definido en el caso de la planta el material acero inoxidable con doble fondo para para el montaje de los componentes
- ✓ Tipo de puertas y botoneras de luz piloto visuales para fácil identificación de operación PLC, bombas componentes mayores y resistencias
- ✓ Botón de paro de emergencia, tipo Hongo (desenergiza todo el sistema)
- ✓ Totalizador de doble línea o fase de 75 Amperios
- ✓ Breaker eléctrico de 10 Amp, para el arranque directo de bomba dosificadora
- ✓ Breaker eléctrico de 30 Amp. para el arranque sistema de calentamiento de resistencias
- ✓ Breaker eléctrico de 30 Amp. para operación del Chiller
- ✓ Muletillas de selección y activación manual y/o selección automática (PLC control logix) sobre la puerta del gabinete
- ✓ Tipo de cableado de potencia y control para los instrumentos
- ✓ Riel Din para montaje de los equipos
- ✓ Entre otros

La distribución general de los componentes señalados anteriormente, así como los sistemas de protección eléctrica, PLC, relés, distribución de cableado, conexasiónado y demás elementos del gabinete de potencia se muestra figura 28 y figura 29

Figura 28. Diseño de panel eléctrico de control gabinete



Fuente: Autor

Figura 29. Gabinete de potencia y conexasiónado



Fuente: Autor

El sistema cuenta con un paro de emergencia en la parte frontal del tablero de potencia como se muestra en la figura 30 el cual, desenergiza todo el sistema. También localmente se tiene por diseño la posibilidad de maniobra en posición

manual y/o automático los circuitos principales de paro y arranque de bombas, chiller y resistencias todos con indicación visual.

Figura 30. Gabinete paro emergencia y selectores manual/automático



Fuente: Autor

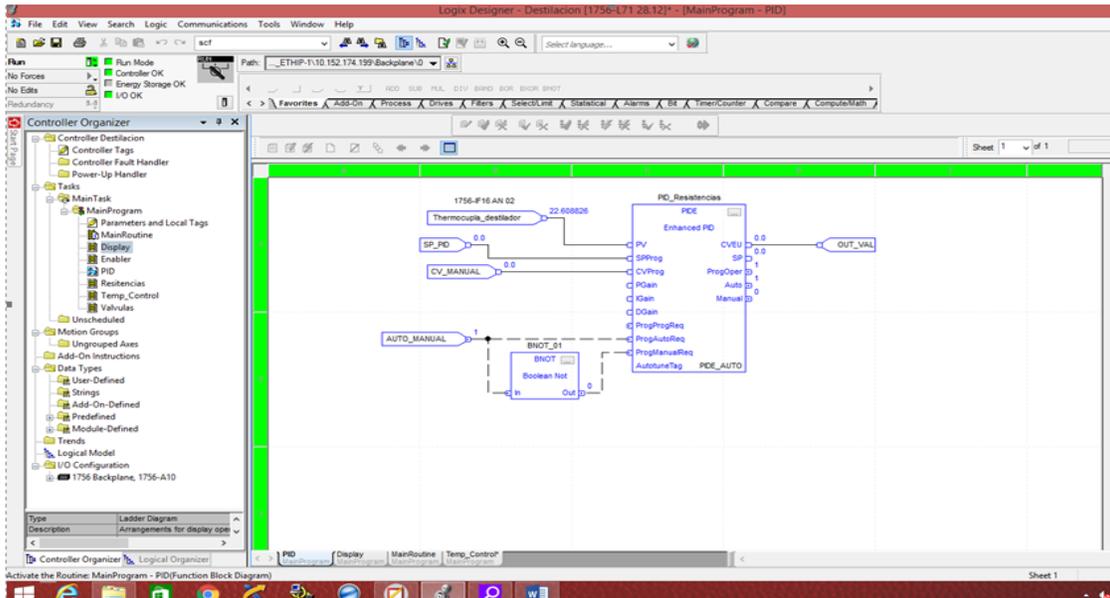
La programación del sistema se realiza con el software de Allen Bradley Rslogix 5000, configurando cada una de las señales de entrada y salida. Así como el accionamiento de cada una de las válvulas, apagado y encendido de las resistencias, bomba etc. Desde el PLC se controla la alimentación de carga al boiler a través un variador de velocidad y la bomba dosificadora peristáltica, ubicada en la parte inferior de la unidad.

La configuración de las estrategias de control opera con controladores PID, entre los que se destaca el lazo que gobierna el calentamiento de las resistencias que suministra energía al boiler. El cual tiene como señal de entrada el sensor de temperatura del fondo del boiler, sin embargo, también puede operar con la temperatura de cima de la columna.

Otro lazo de control PID importante, es configurado para el control de la tasa de reflujo a la torre, el cual puede ser programado por tiempo y/o por relación a la temperatura de la columna. Como se muestra en la figura 31.

Una relación más compleja contempla, el control simultáneo del control de potencia de la resistencia de calentamiento y tasa de reflujo a la columna, permitiendo mejorar el rendimiento de la columna y la eficiencia de destilación de acuerdo a su configuración.

Figura 31. Programa PID



Fuente: Autor

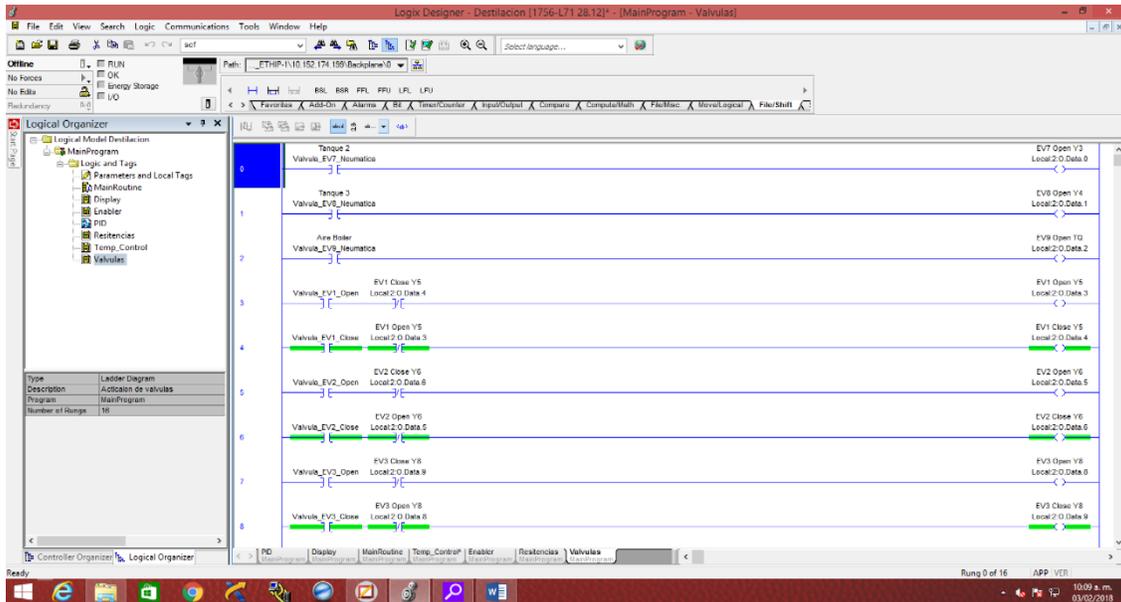
### 2.6.3 Operación básica de los sensores y actuadores

El accionamiento de cada una de las resistencias es gobernado por el PLC, y se realiza mediante salidas digitales que conmutan relés de estado sólido, permitiendo la energización independiente de cada una de las resistencias, las cuales operan a 220 VAC. El sistema de enfriamiento (chiller), también es controlado su encendido a través de la estrategia de control, al igual que el accionamiento de las demás válvulas a disponibilidad del operador.

El programa de control se realiza en lenguaje Ladder a través de la aplicación Logix Designer dentro de Main program de Studio 5000 Logix Designer - Rockwell Automation. Como se muestra en la figura 32 y 33.

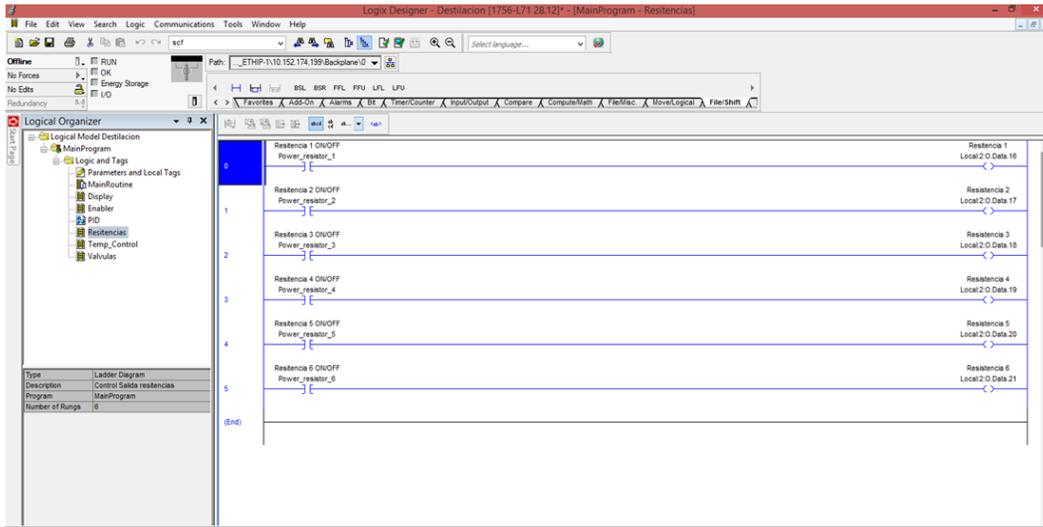
La válvula de alivio es instalada en la cima de la torre de destilación y protege el sistema de sobrepresión, de igual manera los sensores de nivel en los tanques protegen de posibles derrames de producto y controlan el llenado de los mismos. El detector de la primera gota de destilación está ubicado en la salida de la zona de condensación el cual genera una señal digital al paso de fluido e indica cuando se inicia la destilación de componentes.

Figura 32. Programa válvulas de control



Fuente: Autor

Figura 33. Programa resistencias de calentamiento



Fuente: Autor

Los transmisores de nivel son instalados en la parte superior de los tanques y boiler en facilidades mecánicas de 1" de diámetro dispuestos para tal fin.

Los sensores de temperatura tipo RTD Pt 100 de cuatro hilos (cantidad 8) se instalan sobre la columna con el fin de tener el perfil temperatura de la torre durante la operación; en facilidades de 1/4", los demás sensores son destinados para el boiler, y medición de temperatura en los recipientes principalmente.

La planta tiene tres válvulas de control a la salida de los tanques, siete válvulas on/off para manejo de fluidos y una válvula de tres vías para control llenado de los recipientes de producto controlados por el PLC.

Toda la información es recolectada por el PLC Allen Bradley, el cual permite realizar procesos de análisis, tabular y visualización gráfica de resultados a disponibilidad del operador. En la figura 34 se muestra la unida destilación implementada y automatizada lista para operar.

Figura 34. Planta de Destilación y mezclado, laboratorio de control



Fuente: Autor

## 2.7 DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE OPERACIÓN

En el diseño e implementación de los gráficos de proceso dentro de proyecto se involucra la definición de algunos términos como HCI y HMI los cuales se definen a continuación:

HCI (Human – Computer Interaction): Término en sentido amplio que muestra la relación entre el ser humano y las máquinas a través de una correspondencia intercambio mutuo. Sistemas basados en pantallas de computador que permiten interactuar a través de imágenes con las cuales los operadores pueden ver y operar la planta destilación.

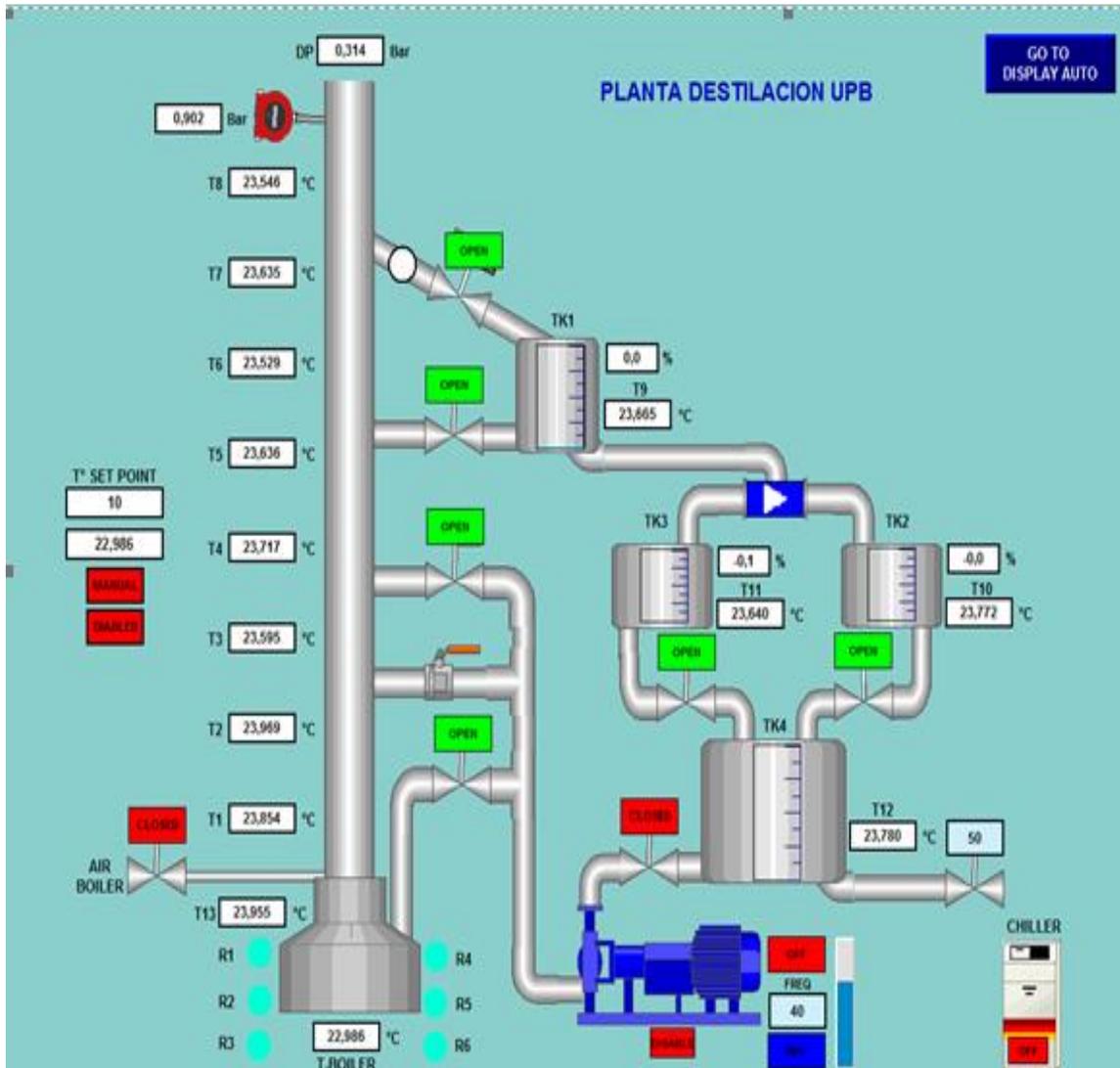
HMI (Human Machine Interface): definido anteriormente en la sección de conceptos importantes.

Entre la normatividad que se tiene en cuenta al momento de desarrollar una interface gráfica se tiene:

- ISO 11064-5 (Ergonomic design of control centres – Part 5 Displays and controls First Edition, 2008)
- DEP 30.00.60.16-Gen (Human factors engineering – Attention Hierarchy coding for graphical displays, 2006)
- DEP 30.00.60.15-Gen (Human/machine interface and control room design Human factors engineering, 2004)
- API 557 (Process Control Systems Functions and Functional Specification Development Part 1, 2004)
- EEMUA PUB 201 (Process plant control desks utilising human-computer interfaces A guide to design, operational and human interface issues, 2002)
- ISA–S5.5–1985 (Graphic Symbols for Process Displays Approved 3, 1986)
- DEP 32.00.00.11-Gen (Human-machine interface in a control room, 1997)
- HMI HANDBOOK (Bill Hollifield, Dana Oliver Lan Nimmo & Eddie Habibi, 2008)

El software de configuración FactoryTalk View Studio de Rockwell Automation sobre el cual se desarrolla el HMI es basado en ambiente Windows y permite la visualización de datos en tiempo real de toda la información de procesos de la unidad su esquema de control y tendencia, como se muestra en la figura 35.

Figura 35. HMI planta de destilación UPB



Fuente: Autor.

#### Características importantes del software desarrollado

- ✓ Control manual/automática de rata de alimentación de flujo
- ✓ Control de potencia de energía de calentamiento
- ✓ Control de rata de reflujo a torre
- ✓ Configuración de alarmas y tendencias
- ✓ Control PID ajustables de calentamiento de boiler, con sensor de temperatura
- ✓ Alternativas de estrategias de control de rata de reflujo, (tiempo, temperatura de columna etc.)
- ✓ Control nivel de tanques
- ✓ Control de mezclado en tanque de producto y carga

### **3. RESULTADO DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y OPERACIÓN DE LA UNIDAD DE MEZCLADO Y DESTILACIÓN.**

Las pruebas de la unidad de destilación es un proceso mediante el cual se busca la verificación de la correcta operación de las diferentes partes del sistema para la aplicación específica de destilación y mezcla, con base en la interconexión de las partes mecánicas, eléctricas, instrumentación, servicios auxiliares, procesamientos y dispositivos en general instalados en la planta.

Entre los objetivos de las pruebas se tiene:

- ✓ Determinar el adecuado funcionamiento y brindar la seguridad, previo al arranque y estabilización de la planta, garantizando un entorno real de control y correcto funcionamiento.
- ✓ Garantizar y evaluar el correcto funcionamiento del sistema de control, a nivel de hardware a las condiciones de operación de la planta.
- ✓ Realizar integración del sistema de control con la instrumentación de la unidad realizando pruebas de respuesta reales, garantizando comunicaciones desde la estación de control PC, hasta cada uno de los instrumentos instalados y energizados en campo.
- ✓ Conocer y evaluar tiempos de respuesta del proceso de acuerdo con la filosofía de control implementada en el PC, permitiendo realizar ajustes y modificaciones que garanticen un desempeño adecuado.

#### **3.1 Inspección física**

En este paso se verifica el inventario e integridad de los elementos que conforma la planta; revisando conexiones mecánicas, acoples, sellos entre boiler y columna, sello con sistema de condensación, válvulas, instalación de sensores, bomba dosificadora entre otros elementos. En la tabla 7, se muestra las actividades realizadas.

Tabla 7. Inspección de la unidad destilación UPB

Ítems	Cumple	No Cumple
Verificación de recipientes según diseño	ok	
Verificación de estructura metálica, plataformas y distribución de componentes mayores	ok	
Verificación mecánica de boiler columna, condensador	ok	
Revisión de instalación de sensores de temperatura, nivel, presión, válvulas	ok	
Inspección de cableado de señales de instrumentación	ok	
Verificación de conexionado en cajas de paso eléctricas	ok	
Orden y cableado sistema de resistencias de calentamiento, calibre de cable, terminación e instalaciones	ok	
verificación de sistema de enfriamiento líneas y chiller	ok	
Verificación de sistema de carga y conexión de bomba dosificadora	ok	
Verificación de sentido de flujo, líneas de proceso y ajuste de conexiones	ok	
Sujeción de riel DIM en gabinetes y distribución de elementos	ok	
Inspección física de gabinete de potencia ( ajuste, puertas, doble fondo, botoneras etc.)	ok	
observaciones:		

Fuente: Autor

### 3.2 Circuitos y Energización

Una vez todo el sistema de la planta de destilación se encuentra ensamblado y conexionado, se realiza el siguiente chequeo correspondiente a la tabla 8. Pruebas de alimentación gabinete e instrumentación.

Tabla 8. Pruebas de Circuitos e Instrumentación

Ítems	Cumple	No Cumple
Inspección cableado de alimentación principal	ok	
Inspección de protecciones eléctricas y puesta a tierra.	ok	
Revisión que el voltaje de alimentación sea el apropiado en cada una de las acometidas, revisando con especial cuidado el circuito de suministro de potencia a sistema a resistencias	ok	
verificación que todos los elementos se encuentren debidamente conectados en gabinete de potencia.	ok	
Verificación posición de todos los breakers y borneras del gabinete de potencia. Asegurando que se encuentre abiertos o desenergizados antes de energizar y su operación en servicio	ok	
verificación funcionamiento de botón de "Paro" de emergencia	ok	
verificación de star / stop local de bomba dosificadora, sistema de calentamiento eléctrico , chiller , variador de velocidad y fuente DC	ok	
Verificación de operación totalizador y carga del sistema	ok	
Verificación de botonera y Muletillas de selección y activación manual y/o selección automática en tablero principal de bombas, resistencias, chiller entre otras	ok	
Verificación energizado de PLC	ok	
observaciones:		

Fuente: Autor

### 3.3 PLC y Programa de aplicación de software

En este paso se verifica la operación funcional del PLC (ControlLogix), el software de programación (FactoryTalk View), HMI (Human Machine Interface) y que la estación de operación funcione correctamente.

Se prueba los módulos I/Os de entrada y salida del PLC, comprobando las señales generadas en campo y leídas en las gráficas de operación del sistema y HMI para cada una de las variables, al igual que el accionamiento de las válvulas y demás elementos instalados en la planta, como se muestra en la figura 36 y 37.

Figura 36. Registro de lectura de información de la Planta

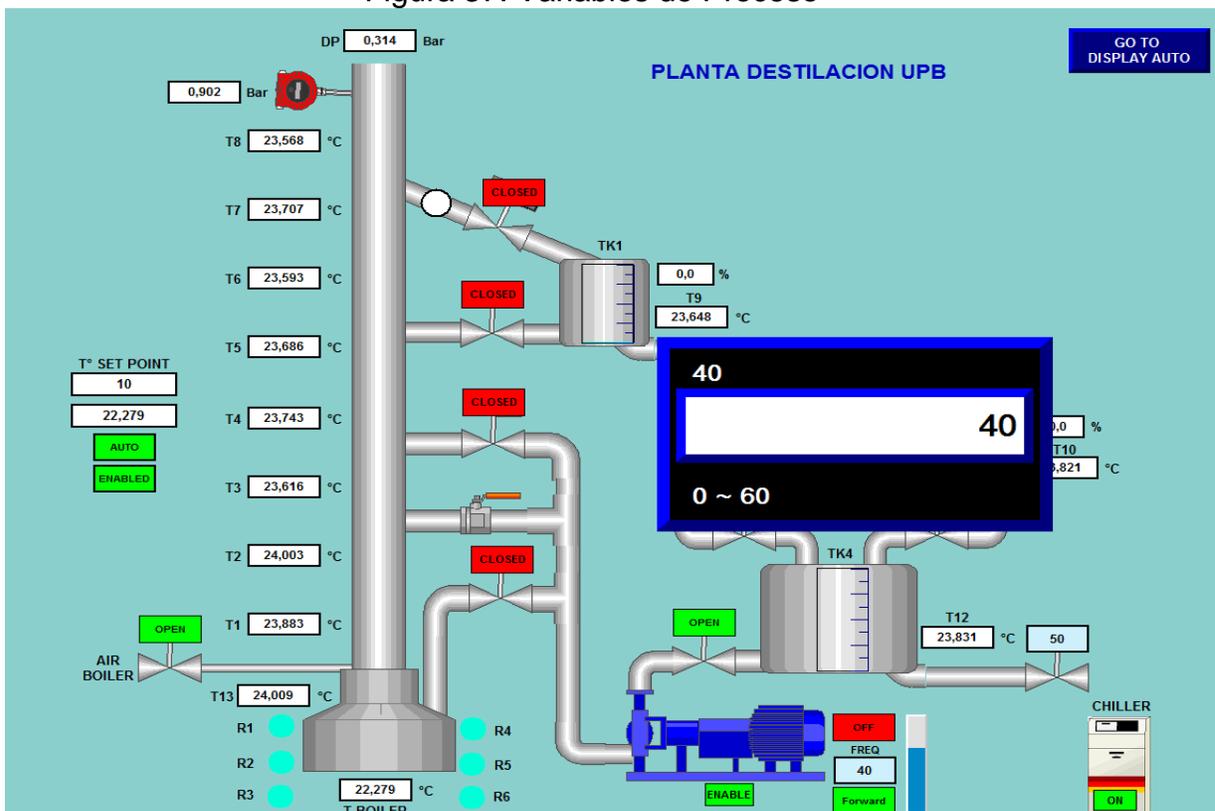
RTD9	22.886887
RTD10	23.075388
RTD11	23.133135
RTD12	23.214012
RTD13	23.444683
Sensor_nivel_1	17.042488
Sensor_nivel_2	16.948269
Sensor_nivel_3	10.700236
Presion_difere...	4.3469906
Presion_relativa	9.760864
Derecha	0

Local:8:1	{...}
Local:8:0	{...}
RTD1	25.767761
RTD2	25.443468
RTD3	25.267868
RTD4	25.383362
RTD5	25.090694
RTD6	24.46508
RTD7	25.165907
RTD8	25.065834
RTD9	25.08204
RTD10	25.19785
RTD11	25.326088
RTD12	25.354095
RTD13	25.437017

Fuente: Autor.

Figura 37. Variables de Proceso



Fuente: Autor

En la tabla 9 se presenta las pruebas de las lógicas y HMI, señalando los resultados de las pruebas de verificación realizadas a cada componente y su respuesta dentro del sistema.

Tabla 9. Pruebas Lógicas y HMI

Ítems	Cumple	No Cumple
Verificación configuración de PLC	ok	
Verificación de módulos I/Os digitales y analógicos	ok	
Verificación de canales configurados de variables de proceso y respuesta de sensores de campo.	ok	
verificación accionamiento de válvulas on/off y válvulas proporcionales	ok	
Verificación de lectura de las 14 RTD y repuesta de las mismas	ok	
Verificación de lectura de las diferencial de presión y sensor de primera gota	ok	
Revisión de encendido y apagado de bomba dosificadora desde HMI	ok	
verificación de lectura y set de programación de frecuencia de operación de variador velocidad que control la bomba	ok	
Verificación de los despliegues configurados	ok	
verificación de funcionamiento de lógica de calentamiento e indicación de cada uno de los segmentos de resistencia activados independientemente.	ok	
Verificación de funcionamiento de PID configurados, cambio de set point y respuesta de control del lazo.	ok	
verificación lectura y escritura de todas las variables de la planta	ok	
Revisión de encendido y apagado de chiller	ok	
Revisión en HMI de cambio de color por estados en dispositivos de encendió y pagado, dirección de flujo y demás animaciones programadas	ok	
observaciones:		

Fuente: Autor

#### **4. CONCLUSIONES**

La simulación en estado dinámico permitió analizar el comportamiento de la planta, evaluando condiciones de operación de la planta como: perfil de temperaturas de columna, reflujo a la torre, duty requerido en el re-hervidor o boiler para el calentamiento de la carga, volumen de carga de la unidad entre otros aspectos, así como la respuesta de la columna de acuerdo a la geometría e hidráulica de platos, diámetros, longitud de la columna y características en general del diseño.

La unidad diseñada, construida y automatizada permite la destilación atmosférica binaria de mezclas de agua y etanol, en diferentes concentraciones. Logrando solucionar durante el diseño problemas de ingeniería básicos como la hidráulica de los platos, tipo de material de construcción de la columna para no contaminar los fluidos de proceso, definición de control e instrumentación, así como protecciones eléctricas de la unidad que garantizan la operación confiable y segura de la planta.

La unidad de destilación construida es un desarrollo de bajo costo, comparada con los altos valores de unidades similares del mercado. Además, el desarrollo permitió la apropiación del conocimiento que a su vez apalanca el crecimiento de la industria local y nacional mediante la generación de conocimiento, capacidades y tecnología, lo cual aporta a generar mayor competitividad a nivel país.

## 5. RECOMENDACIONES

El diseño permite la experimentación en un ambiente seguro. Sin embargo, es importante implementar un sistema de cortes de seguridad (ESD) con indicación de desviaciones del proceso que controlen los riesgos que puedan afectar la integridad de las personas y equipos, cortes por alta presión y alta temperatura, entre otros.

En trabajos futuros con la planta de destilación de la UPB es importante investigar y avanzar en diferentes tipos de estrategia de control óptima coordinada, que combinen la maximización de la eficiencia económica con la maximización de la eficiencia energética de este proceso.

Se recomienda desarrollar herramientas para detección y diagnóstico de fallos operacionales, sobre la planta de destilación de la UPB, que permitan incrementar la seguridad del proceso y la confiabilidad operacional, disminuyendo el riesgo sobre las personas, el medio ambiente y las pérdidas económicas por daños en equipos. Mediante la detección temprana y el diagnóstico de fallos operacionales evitando que los fallos incipientes escalen a situaciones más graves (Lakhdar Aggoune, 2016).

El sistema modular diseñado permite una fácil intervención. Además, los recipientes de carga y producto permiten realizar mezclas mediante el desarrollo de estrategias de control avanzado para blending. También es posible dadas las facilidades la instalación de un agitador magnético en la parte inferior del tanque de carga, así como otros tipos de sensores para la medición de nivel, medición presión, medición temperatura y sensores multipropósito.

El uso de unidad de destilación construida en la UPB constituye una herramienta sin igual para el análisis de fenómenos no lineales, modelamientos, evaluación de técnicas de control clásico, moderno, multi-variable, control avanzado, algoritmos de control y simulación, instrumentación y electrónica, entre otros. También el desarrollo de talleres y prácticas de laboratorio para los estudiantes que deseen profundizar en los temas señalados anteriormente, permitiendo desarrollar tesis en pregrado, maestría y doctorados e implementar diversos experimentos, además permite la formación práctica de estudiantes e incluso operadores de plantas industriales en el tema de mezclado y destilación de productos.

Es importante señalar que el departamento de Santander posee uno de los nichos más importantes del país para el desarrollo de la industria petrolera y petroquímica. En parte por contar con la refinería más grande del país donde la destilación juega un papel fundamental de los procesos que allí se desarrollan y donde éste proyecto encuentra completa aplicabilidad, permitiendo brindar soluciones óptimas, oportunas y prácticas en las áreas de los procesos de refinación y blending, mediante el planteamiento de soluciones a los esquemas actuales de destilación, en busca de un mayor aprovechamiento de los recursos y aumento en la eficiencia y mejoramiento de la calidad productos refinados. Estos se pueden realizar mediante el aprovechamiento de la planta construida en la UPB.

## BIBLIOGRAFÍA

A. M. Alzate Ibañez, Modelado y control de una columna de destilación binaria -Tesis de maestría-, Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2010.

M. A. P. de Carvalho and W. R. Curtis, «II / DISTILLATION/ Pilot Plant Batch Distillation, » The Pennsylvania State University, pp. 1098-1150.

D. W. Green y R. H. Perry, Perry's Chemical Engineers Handbook 8TH Edition, New York: McGraw-Hill, 2007.

Jana, A. K. (2011). Chemical Process Modelling, SECOND EDITION. Department of Chemical Engineering Indian Institute of Technology Kharagpur

M. Montazer, H. Shafaghieh y M. Amouei, «Design and Construction of a Novel Oldershaw-type Distillation Column for, » de European Congress of Chemical Engineering – 6, Copenhagen, 2007.

P. Madson, R. Katzen y G. D. Moon, «Chapter 18,» de Ethanol distillation: the fundamentals, Cincinnati, KATZEN International, pp. 269-288.

APV Americas, Engineered Systems, Distillation Handbook, Tonawanda, N. Y.: Siebe Group Company, Fourth Edition.

H. Uwitonze, H. Sangil y K. S. Hwang, «New Design Method for Fully Thermally Coupled Distillation Column

R. Katzen, P.W. Madson and G.D. Moon, Jr KATZEN International, Inc., Cincinnati, Ohio, USA. Ethanol distillation: the fundamentals

APV Americas, Engineered Systems; Distillation Handbokk fourth edition, Tonawanda, N. Y. Siebe Group Company

Hosanna Uwitonzea, SangilHanb, SungkwonKima, KyuSukHwanga, Structural design of fully thermally coupled distillation column using approximate group methods

Hoshang Eruch Subawalla, B. E., M. S. Modeling, Simulation And Design Of Reactive Distillation Columns; The University of Texas at Austin

Víctor Manuel Espinal Perla, René Wilfredo Jimenez Morales, Kelvin Aarón Peraza Arteaga, Francesco Rainiero Tinetti Castro. Diseño, construcción y validación de un equipo de destilación de alcohol etílico”

Norman P Lieberman, Elizabeth T Lieberman , working guide to process equipment second edition, Mc Graw Hill, New York

Zhao Lei, Chunhai Yi, Bolun Yang, Design, optimization, and control of reactive distillation column for the synthesis of tert-amyl ethyl ether, chemical engineering research and design 91 ( 2013 ) 819–830

Chr. Remberg\*, K. Intemann\*\*, F. N. Fett\* and G. Wozny\*\* Decision supporting system for the design of control systems for distillation columns, Department of Mechanical Engineering, Institute of Energy Technology, University of Siegen, Computers 1994

Anton A. Kiss a,b,\* , Žarko Oluji\_c A review on process intensification in internally heat-integrated distillation columns

Anton A. Kiss a, b,\* , Žarko Oluji, A review on process intensification in internally heat-integrated, Chemical Engineering and Processing, October 2014, journal homepage: [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com) .

Zheng Wang, C. S. (27 November 2018). Process Systems Engineering and Process Safety Soft-sensing modeling and intelligent optimal control strategy. Chinese Journal of Chemical Engineering

Lakhdar Aggoune, Y. C. (2016). Fault detection in distillation column process using kullback leibler divergence. ISA Transactions, Elsevier.

## **ANEXOS**

ANEXO A. Planos de diseño en Solidworks

ANEXO B. Design and Automation of Atmospheric Binary Distillation Unit for Water and Ethanol (Póster)