



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**Destilación del sistema binario etanol-agua mediante aplicación de modelos matemáticos para evaluación de eficiencia de la columna de fraccionamiento.**

**RODRIGUEZ CABRERA ANGEL DARWIN  
INGENIERO QUIMICO**

**PILALOA ZEA ELENA PATRICIA  
INGENIERA QUIMICA**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**Destilación del sistema binario etanol-agua mediante aplicación de modelos matemáticos para evaluación de eficiencia de la columna de fraccionamiento.**

**RODRIGUEZ CABRERA ANGEL DARWIN  
INGENIERO QUIMICO**

**PILALOA ZEA ELENA PATRICIA  
INGENIERA QUIMICA**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**TRABAJOS EXPERIMENTALES**

**Destilación del sistema binario etanol-agua mediante aplicación  
de modelos matemáticos para evaluación de eficiencia de la  
columna de fraccionamiento.**

**RODRIGUEZ CABRERA ANGEL DARWIN  
INGENIERO QUIMICO**

**PILALOA ZEA ELENA PATRICIA  
INGENIERA QUIMICA**

**LEON CUEVA WILSON PATRICIO**

**MACHALA  
2024**

# Destilación del sistema binario etanol-agua mediante aplicación de modelos matemáticos para evaluación de la eficiencia de la columna de fraccionamiento.

*por* Elena Patricia Pilaloe Zea - Angel Darwin Rodríguez Cabrera

---

**Fecha de entrega:** 08-ago-2024 11:50a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2429095032

**Nombre del archivo:** LACI\_N\_PILALOA\_RODR\_GUEZ\_FINAL\_FINAL\_BIBLIOGRAF\_A\_CORREGIDA.docx (8.14M)

**Total de palabras:** 16790

**Total de caracteres:** 94856

# Destilación del sistema binario etanol-agua mediante aplicación de modelos matemáticos para evaluación de la eficiencia de la columna de fraccionamiento.

## INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://pdfcookie.com">pdfcookie.com</a> Fuente de Internet	1%
2	<a href="http://uapa.cuaieed.unam.mx">uapa.cuaieed.unam.mx</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="http://dokumen.pub">dokumen.pub</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="http://riaa.uaem.mx:8080">riaa.uaem.mx:8080</a> Fuente de Internet	<1%
5	<a href="http://idoc.pub">idoc.pub</a> Fuente de Internet	<1%
6	<a href="http://1library.co">1library.co</a> Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Técnica de Machala Trabajo del estudiante	<1%
8	Submitted to Universidad Privada del Norte Trabajo del estudiante	<1%

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, RODRIGUEZ CABRERA ANGEL DARWIN y PILALOA ZEA ELENA PATRICIA, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Destilación del sistema binario etanol-agua mediante aplicación de modelos matemáticos para evaluación de eficiencia de la columna de fraccionamiento., otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



RODRIGUEZ CABRERA ANGEL DARWIN

0750967218



PILALOA ZEA ELENA PATRICIA

0705460012

## DEDICATORIA

A mis papás, Darwin Pilaloa y Lorena Zea, por dedicarme su tiempo, enseñanzas, demostrándome que en la vida nada es fácil, cuesta tiempo, dedicación, preparación, trabajo, y sobre todo me enseñaron a creer en mí, preparándome para un futuro mejor. A mis hermanos, Josue y Marcel, quienes son parte fundamental de mi vida. A toda mi familia, amigos y allegados, quien de una u otra manera son partícipes de mi formación académica y personal.

Y por último a mi abuelo, José Pilaloa, quién me salvó de todos los desayunos, hasta el último día de su vida. Te extraño.

Elena Pilaloa Zea

A mi papá, Darwin Rodríguez, por su sabiduría, por ser el ejemplo de trabajo arduo y saber apoyarme en todo momento para poder cumplir mis sueños. Gracias por enseñarme el significado de constancia y superación en la vida.

A mi mamá, Carola Muñoz, por su cariño incondicional, por su paciencia inquebrantable, por siempre saber aconsejarme en los momentos más difíciles y por tener fe en mí en los momentos que incluso yo no la tenía. Gracias por acogerme en tus brazos y hacerme sentir uno más con tu cariño infinito.

A ambos, que mediante el cariño y firmeza supieron amoldarme para la sociedad actual; su dedicación y sacrificio han sido el sendero que ha conducido en cada paso de este arduo camino. Esta tesis es la evidencia de todas sus enseñanzas.

A mi familia en general, quienes siempre estuvieron pendientes de mis logros para celebrarlos a mi lado, y de mis derrotas para ayudarme a superarlas y seguir adelante. Y, finalmente, a todas las personas que he conocido a lo largo de mi vida, que de alguna manera supieron contribuir en mi desarrollo y en el cumplimiento de este objetivo. Gracias por brindarme sus conocimientos y consejos

Angel Rodriguez C.

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestros más profundos agradecimientos a todas las personas que hicieron posible esta tesis.

En primer lugar, extendemos nuestra gratitud a nuestro director de tesis, Ing. Wilson León Cueva, cuya orientación, paciencia y apoyo constante fueron esenciales para completar este proyecto. Su conocimiento y experiencia han sido invaluable.

Agradecemos también a nuestros profesores y compañeros de la Universidad Técnica de Machala, quienes nos brindaron apoyo académico y moral a lo largo de nuestros estudios. Sus enseñanzas y amistad han sido una fuente continua de inspiración.

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestras familias, por su amor incondicional y constante motivación. Sin su apoyo, comprensión y sacrificio, no habría sido posible lograr este objetivo.

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la columna de destilación fraccionada de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud, de la Universidad Técnica de Machala. Este estudio es de tipo experimental, en el que se empleó la comparación de Normativa como fuente principal para la evaluación y rectificación de la eficiencia que cumple la columna de destilación. Las variables que se consideraron dentro de este trabajo fueron dos componentes en mezcla, que son agua y etanol a diferentes concentraciones (60-40, 80-20, 14-86) respectivamente, que posteriormente fueron llevadas al proceso de destilación dentro de la torre, y obtener un porcentaje de recuperación de etanol ideal. Los resultados fueron procesados a través de tablas y gráficas de McCabe – Thiele que fueron realizadas en el programa de acceso libre-gratuito GeoGebra, con una interfaz didáctica y de fácil uso, que permitieron que los resultados para análisis sean más exactos. Los resultados obtenidos dentro de este trabajo fueron favorables y aceptables según la Normativa PDVSA, el cual nos indica que la torre de destilación estudiada se encuentra por encima del porcentaje mínimo de aceptación (>60%). Además, como datos adicionales de este proceso de destilación, se menciona que se trabaja a una temperatura constante de 78°C dentro de la torre de destilación debido a que se encuentra establecida como la temperatura de ebullición del etanol y así logre la recuperación desea, además se menciona que la presión atmosférica es constante y la temperatura externa es entre 30 a 31°C, la presión interna del equipo no pudo ser controlada, ni de conocimiento, debido que el equipo de destilación no cuenta con un barómetro que facilite la lectura de esta presión.

**Palabras Claves:** *Columna de destilación, eficiencia, sistema binario (etanol-agua), McCabe-Thiele, validación norma PDVSA.*

## ABSTRACT

The objective of this degree work was to evaluate the efficiency of the distillation column of the Faculty of Chemical and Health Sciences of the Technical University of Machala. This is an experimental study, in which the Normative comparison was used as the main source for the evaluation and rectification of the efficiency of the distillation tower. The variables considered in this work were two components in mixture, which are water and ethanol at different concentrations (60-40, 80-20, 14-86) respectively, which were subsequently taken to the distillation process inside the tower, and to obtain an ideal ethanol recovery percentage. The results were processed through McCabe - Thiele tables and graphs that were made in the free access program GeoGebra, with a didactic and easy to use interface, which allowed the results for analysis to be more accurate. The results obtained in this work were favorable and acceptable according to PDVSA regulations, which indicate that the distillation tower studied is above the minimum acceptance percentage (>60%). In addition, as additional data of this distillation process, it is mentioned that a constant temperature of 78°C is used inside the distillation tower because it is established as the ethanol boiling temperature to achieve the desired recovery. It is also mentioned that the atmospheric pressure is constant and the external temperature is between 30 to 31°C, the internal pressure of the equipment could not be controlled, nor of knowledge, because the distillation equipment does not have a barometer that facilitates the reading of this pressure.

**Key words:** *Distillation column, efficiency, binary system (ethanol-water), McCabe-Thiele, PDVSA standard validation.*

## INDICE GENERAL

<b>DEDICATORIA</b> .....	3
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	4
<b>RESUMEN</b> .....	5
<b>ABSTRACT</b> .....	6
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	10
<b>LISTA DE ILUSTRACIONES</b> .....	11
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	12
<b>OBJETIVOS</b> .....	14
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	15
<b>1.1 Destilación</b> .....	15
1.1.1 <i>Conceptualización.</i> .....	15
1.1.2 <i>Tipos de destilación/destiladores</i> .....	16
1.1.2.1 <i>Destilación continua con recirculación.</i> .....	16
<b>1.2 Torre o columna de destilación fraccionada</b> .....	19
1.2.1 <i>Componentes de la torre de destilación fraccionada UTMACH.</i> .....	19
<b>1.3 Leyes que se rigen la torre de destilación fraccionada</b> .....	20
1.3.1 <i>Ley de Raoult.</i> .....	20
1.3.2 <i>Ley de Henry.</i> .....	21
1.3.3 <i>Ley de Dalton.</i> .....	22
1.3.4 <i>Ley Ideal de los Gases.</i> .....	23
<b>1.4 Sistemas binarios</b> .....	24
<b>1.5 Agua</b> .....	24
1.5.1 <i>Conductividad eléctrica del Agua. E</i> .....	25
1.5.2 <i>Sólidos Totales Disueltos (TDS).</i> .....	26
1.5.3 <i>Potencial de Hidrogeno (pH).</i> .....	26
<b>1.6 Alcohol</b> .....	26
1.6.1 <i>Densímetro.</i> .....	27
1.6.2 <i>El hidrómetro.</i> .....	27
<b>1.7 Etanol</b> .....	27
1.7.1 <i>Componentes físicos y químicos.</i> .....	29
1.7.2 <i>Obtención de etanol.</i> .....	30
1.7.3 <i>Obtención de etanol mediante torres de destilación.</i> .....	30
1.7.4 <i>Usos de Etanol</i> .....	30
1.7.4.5 <i>Producción de bebidas alcohólicas.</i> .....	31
<b>1.8 Azeótropos</b> .....	31
1.8.1 <i>Azeótropos positivos</i> .....	31
1.8.2 <i>Azeótropos negativos.</i> .....	32

<b>1.9 Modelos matemáticos para eficiencia en destiladores</b> .....	32
1.9.1 Modelo matemático 1. (Ponchon Savarit).....	32
1.9.2 Modelo matemático 2. (McCabe-Thiele.).....	33
<b>1.10 Eficiencia de la torre de destilación</b> .....	34
1.10.1 Eficiencia del plato (Murphree), EMV.....	35
1.10.2 Eficiencia global, E0.....	35
<b>1.11 Eficiencia</b> .....	36
1.11.1 Eficiencia de Separación.....	36
1.11.2 Eficiencia Energética.....	36
<b>1.12 Factores que afectan la eficiencia de una torre de destilación</b> .....	37
1.12.1 Diseño de la Torre.....	37
1.12.2 Condiciones Operativas.....	37
1.12.3 Propiedades de la Mezcla.....	38
1.12.4 Mantenimiento y Operación.....	38
<b>1.13 Descripción del proceso</b> .....	38
1.13.1 Alimentación.....	38
1.13.2 Calentamiento.....	38
1.13.3 Regulación de la temperatura.....	38
1.13.4 Condensación.....	39
<b>1.14 Manual de Diseño de Proceso (PDVSA)</b> .....	39
<b>2. DISEÑO METODOLÓGICO PRELIMINAR</b> .....	41
<b>2.1 Sujeto o unidad de análisis</b> .....	41
2.1.1 Sujeto de estudio.....	41
2.1.2 Tipo de investigación.....	41
2.1.3 Ubicación de la investigación.....	41
<b>2.2 Tipos de variables</b> .....	41
2.2.1 Variables Independientes.....	41
2.2.2 Variables Dependientes.....	41
<b>2.3 Objeto de estudio y muestra</b> .....	41
2.3.1 Objeto de Estudio.....	41
2.3.2 Muestra.....	41
2.3.3 Ubicación de las muestras.....	41
<b>2.4 Materiales, equipos y métodos</b> .....	42
2.4.1 Materiales.....	42
<b>2.5 Métodos</b> .....	42
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	43
<b>3.1 Concentraciones etanol - agua</b> .....	44
<b>3.2 Cálculo de las concentraciones de las muestras (mezclas)</b> .....	44

<b>3.4 Resultados de la destilación en base al peso – repeticiones</b> .....	46
<b>3.5 Resultados de la destilación en base molar – repeticiones</b> .....	47
<b>3.6 Representación gráfica - Método de McCabe-Thiele</b> .....	53
3.6.1 <i>Análisis de Muestra A1</i> .....	54
3.6.2 <i>Análisis de Muestra A2</i> .....	56
3.6.3 <i>Análisis de Muestra A3</i> .....	57
3.6.4 <i>Análisis de Muestra A2-A3 promedio</i> .....	58
3.6.5 <i>Análisis de Muestra B1</i> .....	59
3.6.6 <i>Análisis de Muestra B2</i> .....	60
3.6.7 <i>Análisis de Muestra B3</i> .....	61
3.6.8 <i>Análisis de Muestra B2-B3 promedio</i> .....	62
3.6.9 <i>Análisis de Muestra C1</i> .....	63
3.6.10 <i>Análisis de Muestra C2</i> .....	64
3.6.11 <i>Análisis de Muestra C3</i> .....	65
3.6.12 <i>Análisis de Muestra C2-C3 promedio</i> .....	66
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	67
<b>5. RECOMENDACIONES</b> .....	68
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	69
<b>7. ANEXOS</b> .....	80

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características físicas y químicas.....	29
Tabla 2. Datos de equilibrio para el sistema etanol-agua a 1 atm. (x, y, fracciones molares de etanol). .....	32
Tabla 3. Eficiencia global de diseño.....	39
Tabla 4. Materiales, equipos y reactivos.....	42
Tabla 5. Parámetros de las diferentes muestras analizadas.....	43
Tabla 6. Muestras de etanol a diferentes concentraciones.....	44
Tabla 7. Muestra al 40% etanol – 60% agua.....	47
Tabla 8. Muestra al 20% etanol – 80% agua.....	47
Tabla 9. Muestra al 14% etanol – 86% agua.....	47
Tabla 10. Muestra A1 (% peso).....	49
Tabla 11. Muestra A1 (% molar).....	49
Tabla 12. Muestra A2 (% peso).....	49
Tabla 13. Muestra A2 (% molar).....	49
Tabla 14. Muestra A3 (% peso).....	50
Tabla 15. Muestra A3 (% molar).....	50
Tabla 16. Muestra A2-A3 (% molar promediada).....	50
Tabla 17. Muestra B1 (% peso).....	50
Tabla 18. Muestra B1 (% molar).....	50
Tabla 19. Muestra B2 (% peso).....	51
Tabla 20. Muestra B2 (% molar).....	51
Tabla 21. Muestra B3 (% peso).....	51
Tabla 22. Muestra B3 (% molar).....	51
Tabla 23. Muestra B2-B3 (% molar promediada).....	51
Tabla 24. Muestra C1 (% peso).....	52
Tabla 25. Muestra C1 (% molar).....	52
Tabla 26. Muestra C2 (% peso).....	52
Tabla 27. Muestra C2 (% molar).....	52
Tabla 28. Muestra C3 (% peso).....	52
Tabla 29. Muestra C3 (% molar).....	52
Tabla 30. Muestra C2-C3 (% molar promediada).....	53

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Anexo A. Multiparámetro, mediciones de EC, pH y TDS para muestras de agua.....	80
Anexo B. Rectificación del %etanol con densímetros. ....	80
Anexo C. Preparación de las muestras (agua-etanol).....	80
Anexo D. Destilación de la mezcla en la torre de fraccionamiento .....	81
Anexo E. Torre de destilación en funcionamiento .....	81
Anexo F. Temperatura idónea de 78°C para separación de la mezcla.....	81
Anexo G. Verificación del %etanol recuperado de las muestras mediante densímetros .....	82
Anexo H. Muestras del %etanol recuperado de las todas las repeticiones .....	82

## INTRODUCCIÓN

La destilación es un proceso ampliamente utilizado en la industria química para separar mezclas de sustancias líquidas basadas en sus diferentes puntos de ebullición. Desde su descubrimiento, ha sido fundamental en numerosos campos industriales, incluyendo la producción de productos farmacéuticos, combustibles y bebidas alcohólicas. Entre las muchas aplicaciones de la destilación, el sistema binario etanol-agua ocupa un lugar destacado debido a su importancia en la producción de biocombustibles, bebidas destiladas y otros productos de consumo.

El proceso de destilación se fundamenta en las diferencias de los puntos de ebullición de los distintos componentes presentes en una mezcla. En el caso del sistema binario etanol-agua, esta diferencia es particularmente significativa, ya que el etanol y el agua tienen puntos de ebullición de aproximadamente 78.5 °C y 100 °C, respectivamente, a presión atmosférica. Esta disparidad permite la separación eficiente de los dos componentes mediante la destilación, con el etanol volatilizándose antes que el agua.

La eficacia de un equipo de destilación, que es el corazón de la operación de destilación, juega un papel crucial en la calidad y rentabilidad del proceso. Un equipo de destilación eficiente garantiza una separación adecuada de los componentes de la mezcla, minimizando las pérdidas y maximizando el rendimiento del producto deseado. Por lo tanto, evaluar y mejorar la eficiencia de la columna de destilación es un objetivo clave en la optimización de los procesos industriales que involucran destilación.

En este contexto, la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud (FCQS) de la Universidad Técnica de Machala (UTMACH) se destaca como un centro de excelencia en investigación y desarrollo en el campo de la ingeniería química. Con instalaciones y equipos de última generación, la FCQS está equipada para llevar a cabo investigaciones de vanguardia en diversos aspectos de la ingeniería química, incluida la destilación de sistemas binarios.

La presente tesis se propone evaluar la eficiencia de la columna de destilación de la FCQS de la UTMACH mediante la destilación de un sistema binario etanol-agua. Para lograr este objetivo, se aplicarán modelos matemáticos que permitan comprender y predecir el comportamiento del sistema durante el proceso de destilación. Estos modelos, basados en principios termodinámicos y cinéticos, proporcionarán una

herramienta invaluable para la evaluación y optimización de la eficiencia de la columna de destilación.

El enfoque metodológico de esta tesis incluirá una revisión exhaustiva de la literatura existente en cuanto a destilación de sistemas binarios, modelos matemáticos aplicables y metodologías de evaluación de la eficiencia de columnas de destilación. Posteriormente, se describirá en detalle el diseño experimental llevado a cabo en la FCQS de la UTMACH, incluyendo los procedimientos utilizados, los equipos empleados y los resultados obtenidos.

Los resultados experimentales serán comparados y contrastados con los resultados predichos por los modelos matemáticos seleccionados, con el fin de validar su aplicabilidad en el contexto específico del sistema binario etanol-agua y la columna de destilación estudiada. Además, se discutirán las implicaciones de estos hallazgos en términos de mejora de la eficiencia del proceso de destilación y su relevancia para la industria.

En resumen, esta tesis se propone contribuir al conocimiento existente en el campo de la destilación de sistemas binarios, proporcionando una evaluación integral de la eficiencia de la columna de destilación de la FCQS de la UTMACH mediante la aplicación de modelos matemáticos. Se espera que los resultados de este estudio no solo tengan relevancia académica, sino también aplicaciones prácticas en la optimización de procesos industriales relacionados con el sistema binario etanol-agua.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Evaluar la eficiencia de la columna de destilación de la FCQS de la UTMACH mediante la destilación de un sistema binario aplicando modelos matemáticos.

### **Objetivos Específicos**

- Identificar el modelo matemático óptimo para la destilación de un sistema binario (etanol-agua).
- Determinar la eficiencia de la columna de destilación de un sistema binario.
- Validar la eficiencia de la columna de destilación mediante la comparación de bibliografías.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Destilación

*1.1.1 Conceptualización. “La destilación es una técnica comúnmente utilizada para la separación de mínimo un componente de una corriente líquida con puntos de ebullición relativamente diferentes. Este proceso permite fraccionar los componentes de la mezcla de acuerdo con su volatilidad relativa.”<sup>1</sup>*

Esta operación unitaria, nos posibilita la separación o fraccionamiento de los elementos dados en una mezcla en función de los componentes de volatilidad, el cual da lugar por medio de esta separación dos corrientes, por un parte, una corriente enriquecida con el componente más volátil y otra corriente con mayor concentración del componente menos volátil.<sup>1</sup>

*“La destilación es una operación unitaria que consiste en la separación de los componentes de una mezcla líquida (en la que todos los compuestos son más o menos volátiles) por evaporación y condensación sucesivas.”<sup>2</sup>*

En general, el método de separación por diferencias de volatilidades de cada compuesto de la mezcla líquida se lleva a cabo por secuencias de evaporación y condensación o también definida como un proceso de separación entre líquidos miscibles que usa como propiedad fundamental la diferencia en el punto de ebullición de los diferentes líquidos.<sup>3</sup>

*“De manera resumido, la destilación es un proceso de separación de compuestos químicos basado en las diferencias en sus presiones de vapor.”<sup>4</sup>*

El propósito fundamental de la destilación es dividir una composición de diversos componentes utilizando sus distintos puntos de ebullición, o desprender sustancias evaporables de aquellas que no lo son.<sup>4</sup>

La destilación es una de los procedimientos de laboratorio más esenciales para refinar fluidos evaporables. Es empleado de manera extensiva para producir bebidas alcohólicas, refinar petróleo, y obtener diversos productos petroquímicos, entre otros usos industriales. Es uno de los métodos de separación más comunes.<sup>5</sup>

*“El proceso de destilación fue eficaz para separar los componentes y producir una fracción pesada con propiedades y composición mejoradas y que podría utilizarse como materia prima para futuros procedimientos de mejora o como material para mezclar.”<sup>6</sup>*

A pesar de ser la tecnología de separación predominante en la industria química, la destilación se percibe como la tecnología de mayor consumo energético. Los críticos de la destilación citan la necesidad de vaporizar uno o más componentes de la mezcla como la razón de su carácter intensivo en energía.<sup>7</sup>

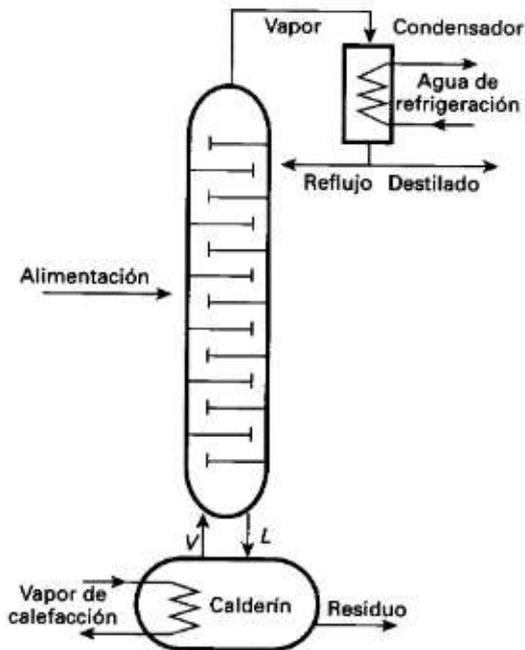
Para calcular la composición del vapor que se va a desprender, se supondrá que este se encuentra en equilibrio con la fase líquida presente en cada instante del proceso. Los distintos métodos empleados en la destilación se pueden clasificar dependiendo el objetivo del proceso, entre ellos tenemos: destilación simple, destilación con enriquecimiento y destilación con arrastre de vapor.<sup>2</sup>

*1.1.2 Tipos de destilación/destiladores.* Los destiladores se pueden clasificar de diversas maneras según varias características, como el tipo de flujo (ya sea contracorriente o directo), el material a destilar, la temperatura, y el número de platos, entre otras características importantes.<sup>8,9</sup>

*1.1.2.1 Destilación continua con recirculación.* Se emplea esencialmente para desprender elementos con temperaturas de burbujeo muy diferentes. Es ineficaz para separar componentes con volatilidades similares, los cuales necesitan la aplicación de la destilación fraccionada con retorno.<sup>2</sup>

“Para la producción en gran escala, es más común la destilación continua que se describe en esta sección, que la destilación discontinua que se estudiará posteriormente en este capítulo.”<sup>10</sup>

Figura 1. Esquema de una columna de rectificación de pisos.

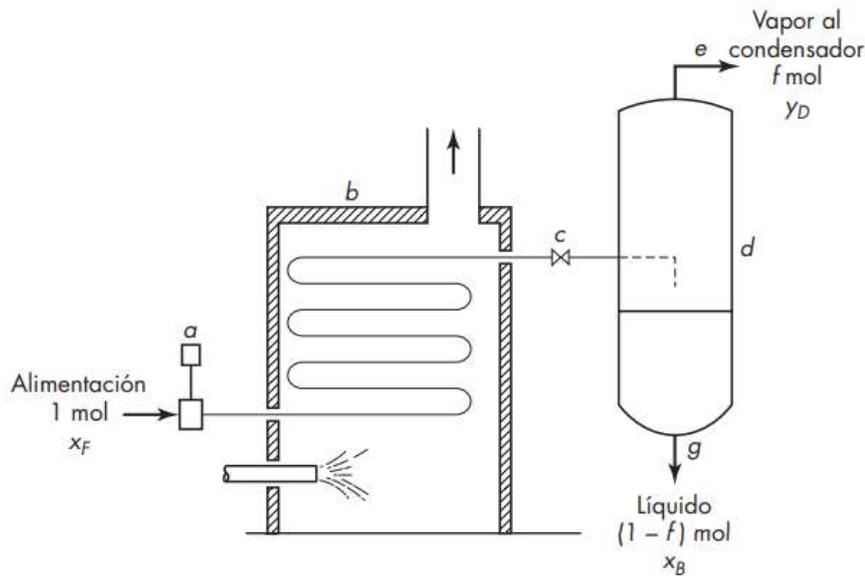


Fuente:<sup>11</sup>

1.1.2.2 Destilación flash. “La destilación instantánea o flash consiste en la vaporización de una fracción definida del líquido, en una manera tal que el vapor que se forma está en equilibrio con el líquido residual, separando el vapor del líquido y condensando el vapor.”<sup>2</sup>

Una mezcla de fase líquida y gaseosa firmemente integrada ingresa en el separador “d”, donde permanece el lapso necesario para que las corrientes que ingresaron se puedan separar. Como resultado del contacto prolongado entre ambas fases antes de su separación, los flujos resultantes están en equilibrio. El vapor sale por la línea “e” y el líquido por la línea “g”.<sup>10</sup>

Figura 2. Planta de destilación flash o instantánea.



Fuente:<sup>10</sup>

1.1.2.3 Destilación fraccionada. “La destilación fraccionada se utiliza cuando la mezcla de productos líquidos que se pretende destilar contiene sustancias volátiles de diferentes puntos de ebullición con una diferencia entre ellos menor a 80 °C.”<sup>2</sup>

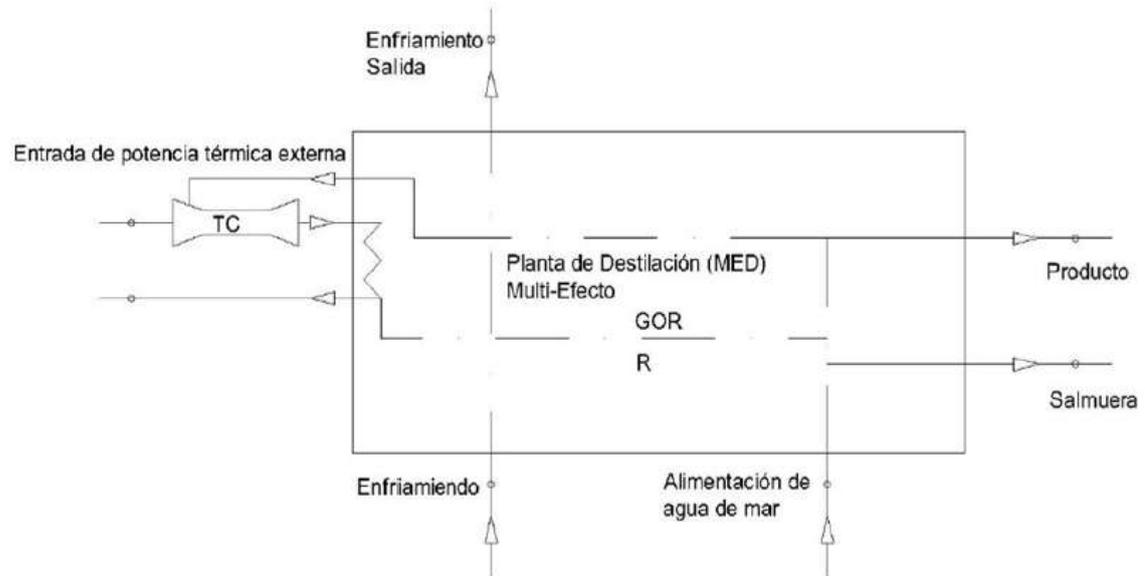
Al aumentar la temperatura de una mezcla de líquidos con distintas presiones de vapor, este último se amplía con el componente más reactivo, lo cual se emplea para optimizar la separación de los diferentes compuestos líquidos por medio este tipo de volatilización. La característica mayormente destacada de esta destilación es la necesidad de una torre de separación fraccionada. Este tipo de destilación puede efectuarse a presión estándar o a presión baja, similar a lo explicado previamente para la destilación simple.<sup>5</sup>

La destilación fraccionada se define como la separación de diferentes compuestos químicos mediante sus puntos de ebullición, para ello se los calienta a una temperatura a la que varias fracciones del compuesto se evaporarán. La destilación fraccionada se utiliza para separar una mezcla de sustancias con diferencias mínimas en los puntos de ebullición y es el paso más importante en el proceso de refinado.<sup>12</sup>

1.1.2.4 Destilación Multiefectos. El proceso utiliza una unidad de evaporación con diversos efectos a condiciones de temperatura y presión en reducción para evaporar agua. El calor del vapor externo evapora el agua de alimentación rociada desde arriba. El vapor del primer efecto se transfiere al siguiente para continuar la evaporación en cadena. Al final, el vapor se condensa y se recoge como producto. La salmuera no

evaporada avanza al siguiente efecto y la restante se descarta al mar. Separadores previenen que las gotas salinas alcancen las superficies de condensación.<sup>13</sup>

Figura 3. Esquema básico de la central térmica asumida a presión de condensación de 0.04 bar



Fuente:<sup>13</sup>

## 1.2 Torre o columna de destilación fraccionada

Una columna de fraccionamiento cuenta con pequeños platos que estarán ubicados a lo largo de la torre, de manera que las pequeñas cantidades de líquido en cada uno de estos platos se enriquecen progresivamente en el componente más volátil durante el proceso de destilación. El plato ubicado en la parte superior de la columna contendrá el líquido con mayor concentración de este componente volátil.<sup>5</sup>

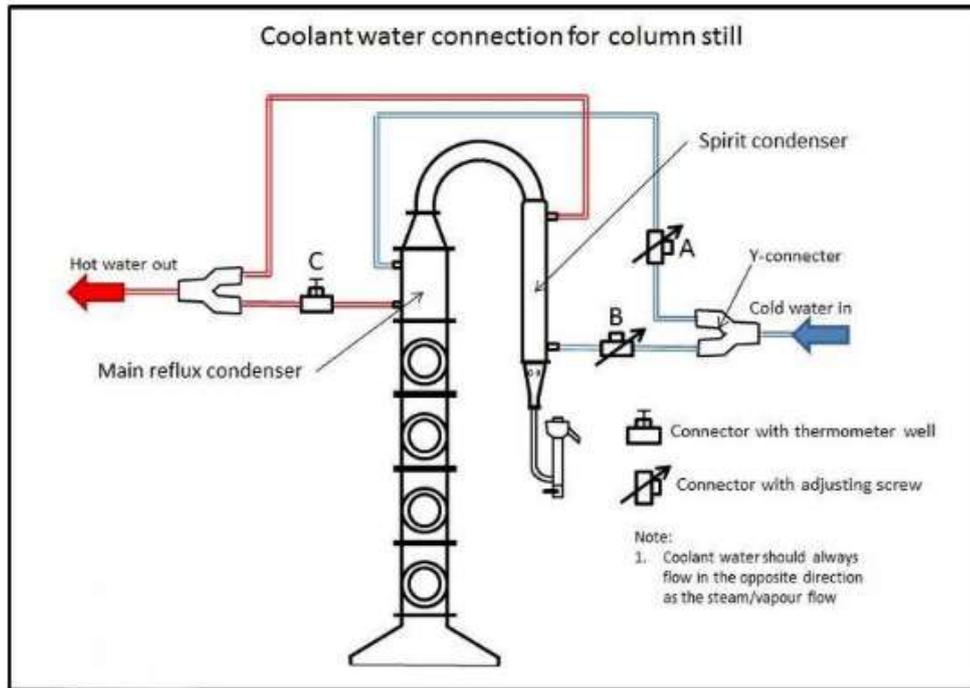
*“La destilación fraccionada, también se usa en la industria química para separar sustancias con puntos de ebullición muy altos, que requieren una gran de energía para separarlas a presión atmosférica.”<sup>14</sup>*

### 1.2.1 Componentes de la torre de destilación fraccionada UTMACH.

- Camiseta de mirilla de 4x4 pulgadas
- Placas de burbujas de cobre de 4x4 pulgadas con tapas y bajantes
- Deflegmador de 1x4 pulgadas
- Reductor de abrazadera triple de 1x 4 pulgadas a 2 pulgadas con termómetro
- Codos de triple abrazadera de 2x2 pulgadas y 90 grados
- Condensador de escopeta de 1x2 pulgadas

- Disyuntor contra sobretensiones de 1x2 pulgadas a 1,5 pulgadas
- Abrazadera triple de 6\*4 pulgadas / abrazadera triple de 4x2 pulgadas / abrazadera
- triple de 2x1,5 pulgadas
- Juntas de silicona para las abrazaderas triclamps.

Figura 4. Columna 4 Pulgadas



Fuente: <sup>15</sup>

### 1.3 Leyes que se rigen la torre de destilación fraccionada

En sistemas en el cual se tomen o se encuentren en un funcionamiento perfecto, puede aplicarse la ley de Dalton, la ley de Raoult y la ley de Henry para describir los equilibrios del proceso.

1.3.1 Ley de Raoult. “La presión parcial de vapor de un componente en una mezcla es igual a la presión de vapor del componente puro a esa temperatura multiplicada por su fracción molar en la mezcla.”<sup>16</sup> La Ley de Raoult solo es aplicable a mezclas ideales. Para una mezcla de líquidos A y B, la ley se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$P_A = X_A \cdot P_A^* \quad (1)$$

$$P_B = X_B \cdot P_B^* \quad (2)$$

Donde:

$P_A$  = Presión parcial del componente A (atm).

$P_B$  = Presión parcial del componente B (atm).

$X_A$  = Fracción molar del componente A (moles).

$X_B$  = Fracción molar del componente B (moles).

En esta ecuación,  $P_A$  y  $P_B$  son las presiones de vapor parciales de los componentes A y B. En cualquier mezcla de gases, cada gas ejerce su propia presión parcial, un fenómeno conocido como presión parcial. Esto significa que cada gas contribuye de manera independiente a la presión total de la mezcla. Incluso si se eliminaran todos los demás gases, el gas restante seguiría ejerciendo su presión parcial.<sup>16</sup>

La presión total de la mezcla se calcula como la suma de las presiones parciales individuales de cada gas:

$$P_{total} = P_A + P_B \quad (3)$$

Donde:

$P_A$  = Presión parcial del componente A (atm).

$P_B$  = Presión parcial del componente B (atm).

*“Los  $P^*$  valores son las presiones de vapor de A y B si fueran por su cuenta como líquidos puros.  $X_A$  y  $X_B$  son las fracciones molares de A y B.”<sup>16</sup>*

Se calcula la fracción molar por medio de la siguiente formula:

$$X_A = \frac{\text{moles de A}}{\text{número total de moles}} \quad (4)$$

$X_A$  = Fracción molar del componente A dividido para el número de moles total (adimensional).

**1.3.2 Ley de Henry.** Formulada en 1803 por el industrial y científico inglés William Henry, es un caso particular de la ley de Raoult.<sup>16</sup> *“Un cambio de presión no influye de forma*

apreciable en la solubilidad de sólidos o líquidos o de líquidos en líquidos; sin embargo, la de los gases en los disolventes aumenta cuando se incrementa la presión parcial de los gases.<sup>17</sup> La solubilidad de un gas depende de la presión y la temperatura. Cuando este se encierra en una disolución saturada, hay un equilibrio entre el gas y la disolución.<sup>16</sup>

Si la presión aumenta, el equilibrio se moverá en la dirección en la cual se reduce la presión, Principio de Le Chatelier.<sup>18</sup> *“La presión se puede reducir si hay más gas disuelto en el disolvente. Así, la solubilidad o concentración de un gas, en un disolvente dado, incrementa con el aumento de la presión.”*<sup>18</sup>

La ley de Henry establece que *“Para un gas en contacto con un disolvente, a una temperatura constante, su concentración en el disolvente es directamente proporcional a su presión.”*<sup>19</sup>

Matemáticamente, la ley de Henry se expresa como

$$C_{gas} = k * P_{gas} \quad (4)$$

Donde:

$P_{gas}$  = La presión del gas que entra en contacto con la disolución se mide en atmósferas (atm) o milímetros de mercurio (mmHg).

$k$  = Constante particular para un gas específico y un disolvente a una temperatura dada (adimensional).

$C_{gas}$  = La concentración del gas disuelto (%).

Las limitantes de esta ley es que solo es aplicable a gases que se comportan de manera más o menos perfectas, es decir, a temperaturas y presiones controladas, cuando la capacidad de disolución del gas en el disolvente es baja y cuando no reacciona con el disolvente para formar nuevas especies. Por ejemplo, el amoníaco o el HCl, que reaccionan con el agua, no siguen la ley de Henry. Además, la ley no es aplicable si el gas se asocia o disocia en la disolución con el disolvente.<sup>18</sup>

**1.3.3 Ley de Dalton.** John Dalton, en el año de 1807, propuso que, *“En una mezcla de gases, cada componente ejerce una fuerza como si estuviera solo en el contenedor. La presión individual de cada gas en la mezcla se define como presión parcial.”*<sup>20</sup>

La ley de Dalton nos establece lo siguiente: *“La presión de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de todos los gases presentes.”*<sup>20</sup>

La ecuación para una mezcla de gases A y B es:

$$P_T = X_A * P_T + X_B * P_T \quad (5)$$

Donde:

$P_T$  = La presión total (atm, mmHg).

$X_A$  = La fracción molar del gas A.

$X_B$  = La fracción molar del gas B.

*“Basándonos en la Ley de Dalton podemos expresar que la concentración de un gas es igual a la presión parcial del gas (P) dividida por la presión barométrica (PB).”<sup>21</sup>*

*1.3.4 Ley Ideal de los Gases. “Los gases ideales son unas sustancias hipotéticas que se constituyen en una herramienta clave para el estudio de distintos procesos y ciclos termodinámicos.”<sup>22</sup>*

*“El modelo de los gases ideales también se utiliza en la elaboración de balances de masa y energía en las operaciones físicas y los procesos químicos que ocurren en las industrias relacionadas.”<sup>22,23</sup>*

No obstante, en lo que se enfoca de manera matemática es lo siguiente:

$$PV = nRT \text{ ó } P_{abs}V = nRT_{abs} \quad (6)$$

Donde:

$P_{absoluta}$  = La presión absoluta (atm, mmHg).

$V$  = Volumen ( $m^3$ , L)

$T$  = Temperatura (K, °C)

$R$  = Constante de los gases ((atm x L) / (mol x K))

$n$  = número de moles (moles)

Conocida como la ecuación de estado de los gases ideales o gases perfectos, o bien como una variante de esta llamada la ley combinada de los gases ideales.:

$$\frac{P_1 * V_1}{T_1} = \frac{P_2 * V_2}{T_2} \quad (7)$$

$P_1$  = La presión en el punto 1 (atm, mmHg).

$P_2$  = La presión en el punto 2 (atm, mmHg).

$V_1$  = Volumen en el punto 1 ( $m^3$ , L).

$V_2$  = Volumen en el punto 2 ( $m^3$ , L).

$T_1$  = Temperatura (K, °C).

$T_2$  = Temperatura (K, °C).

#### 1.4 Sistemas binarios

Los parámetros iniciales principales para una destilación binaria son; volatilidad relativa, período de recuperación, flujo de alimentación y consigo el porcentaje de eficiencia propuesta por el diseño.<sup>24</sup>

Los parámetros que además se rigen a un sistema binario para destilación, son variables independientes como; temperatura, presión, composición del sistema.<sup>25</sup>

*“Las mezclas susceptibles a destilación pueden contener dos líquidos, un sólido en un líquido o incluso gases licuados, puesto que este método aprovecha el punto de ebullición de las sustancias, una de las características inherentes a la materia.”<sup>26</sup>*

#### 1.5 Agua

De acuerdo con la RAE, el agua se define como “Sustancia líquida inodora, incolora e insípida en estado puro”. Este sustantivo es femenino.”<sup>27</sup>

Se calcula que solo alrededor del 1% del agua dulce del planeta es accesible para los seres humanos y los ecosistemas. La calidad de esta agua está en peligro debido al crecimiento poblacional y a las actividades humanas.<sup>28</sup>

A nivel nacional, 1.195 fuentes hídricas fueron utilizadas para la captación y distribución de agua apta para consumo.

*“El agua es un alimento primario, un macronutriente y un vehículo para la producción, preparación, transformación e ingesta de los alimentos.”<sup>29</sup>* El agua es uno, si no el más importante, alimento del ser humano, ya que es el responsable de llevar a cabo muchos de los procesos biológicos en el ser humano y en otras especies del ecosistema.

Se considera el nivel de calidad del agua requerida a partir del tipo de proceso empleado donde el agua es requerida, ya sea para la elaboración directa de un producto, limpieza de equipos y materiales, o servicios donde el agua es indispensable para llevar a cabo actividades como enfriamiento, transporte, calentamiento, entre otros.<sup>29</sup>

El agua dentro de los equipos industriales, desempeñan un papel significativo debido que contribuye en la separación de componentes por fases y obtención de productos finales de alta pureza, que se plantea en una torre de destilación. Entre algunos de los aspectos a recalcar que contribuye el agua dentro de los equipos de destilación son; condensación, reflujo, lavado, enfriamiento.<sup>30</sup>

Las principales características que debe poseer el agua para una industria o en la utilización para procesos de destilación debe ser: incolora, inodora, insípida, carecer de elementos en suspensión y libre de contaminantes.<sup>31</sup> El proceso de destilación elimina iones del agua como cloruros, fluoruros, magnesio y sales calcáreas.

El agua como se menciona es el componente esencial en todo proceso de destilación, ya que es la parte clave para que ocurra esta separación, recuperación, lavado de los componentes partícipes en la fase.

Continuadamente se utiliza agua destilada como componente principal en los procesos de destilación, ya que se encuentra libre de ciertos compuestos que posee el agua potable, entre ellos se puede mencionar diferentes conceptos para el agua como: destilada, desionizada, desmineralizada, de laboratorio, purificada, bidestilada.<sup>26</sup>

*1.5.1 Conductividad eléctrica del Agua.* Es la valoración de la capacidad que posee el agua para transferir corriente. En el Sistema Internacional, la conductividad eléctrica se mide en siemens por metro (S/m), tomando como referencia una temperatura de 25°C.<sup>32,33</sup>

La capacidad del agua para conducir electricidad está vinculada al contenido salino del agua, las cuales se disocian en iones que pueden transportar electricidad. La capacidad de disolución de estos compuestos iónicos en el agua está influenciada por la temperatura.

**1.5.2 Sólidos Totales Disueltos (TDS).** Los sólidos totales disueltos, TDS por sus siglas en inglés, se refieren a la cantidad de material sólido presente en un volumen determinado de agua en forma disuelta. Estos sólidos pueden incluir minerales, sales, metales, cationes y aniones. Los TDS se suelen medir en miligramos por litro (mg/L) o partes por millón (ppm).<sup>34</sup>

Los TDS en el agua pueden provenir de diversas fuentes, como minerales naturales, residuos industriales, aguas residuales, productos químicos agrícolas y sales utilizadas en carreteras. La cantidad de TDS es un indicador de la calidad del agua; niveles elevados pueden influir en el sabor, la claridad y la seguridad del agua para el consumo humano y otros usos. Sin embargo, no todos los sólidos disueltos son dañinos; algunos, como el calcio y el magnesio, son esenciales para la salud.<sup>34,35</sup>

**1.5.3 Potencial de Hidrogeno (pH).** El índice pH es una magnitud que determina las propiedades ácido-base de una solución. Este es representado en una gradación, la misma que va desde 0 a 14, la mitad de la escala, es decir 7, se considera neutro, así mismo los valores que se encuentren por debajo de 7 serán considerados como ácidos y los mayores a 7 como bases.<sup>36</sup>

Factores como la interacción con el dióxido de carbono del aire, la presencia de minerales y otras sustancias disueltas pueden hacer que el pH del agua natural se desvíe ligeramente del 7. Por ejemplo, el agua de lluvia puede tener un pH más bajo (alrededor de 5.5) debido al dióxido de carbono que se disuelve en ella formando ácido carbónico débil.<sup>37</sup>

El pH del agua es importante para la calidad del agua, ya que puede influir en su sabor, su efecto sobre las tuberías y equipos, y su compatibilidad con organismos vivos y procesos industriales.<sup>38</sup>

## **1.6 Alcohol**

*“Se utiliza la palabra «alcohol» cuando nos referimos al alcohol etílico o etanol (CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-OH); líquido claro, incoloro, volátil, inflamable, de infinita solubilidad en agua y miscible en cloroformo y éter.”*<sup>39</sup> El término alcohol generalmente se refiere al término de etanol o alcohol etílico, de origen orgánico, que se utilizan para soluciones que implican destilaciones, soluciones, concentraciones u otras áreas de limpieza.<sup>40</sup>

El alcohol etílico es un líquido transparente e incendiable que hierve a 78 grados centígrados. Cuando se combina con agua, independientemente de las proporciones, se obtendrá una mezcla azeotrópica. Es un líquido volátil presente en varias bebidas fermentadas.<sup>41</sup>

El alcohol se obtiene principalmente de fermentaciones, sean de carbohidratos o azúcares, que son modificados para la obtención de este producto a diferentes concentraciones o pureza. Comúnmente es utilizados en las industrias químicas como solvente para la aplicación de soluciones a diferentes grados de concentración.<sup>42</sup>

*1.6.1 Densímetro. “Este alcoholímetro determina el nivel de alcohol presente en su destilado y no debería faltar en ningún proceso de destilación. También para graduar su aguardiente hecho en casa al porcentaje apto y deseado para el consumo.”<sup>43</sup>*

El alcoholímetro es un instrumento de laboratorio que se usa de manera general para determinar o medir el nivel de alcohol que se encuentra disponible en un líquido o gas determinado. Se puede utilizar para medir el porcentaje de alcohol y detectar su presencia en la sangre o en un gas.<sup>44</sup>

El líquido a medir se vierte en un recipiente profundo, el densímetro se introduce cuidadosamente en el líquido hasta que flote libremente. La lectura de la densidad relativa del líquido se obtiene observando el punto en el que la superficie del líquido toca el vástago del densímetro en la escala graduada.<sup>45</sup>

*1.6.2 El hidrómetro. Es un instrumento ampliamente utilizado en la industria para medir la densidad de los líquidos. Funciona flotando en el líquido con el que se esté trabajando, y la lectura se toma en el punto/raja de la escala del hidrómetro.<sup>46</sup>*

## **1.7 Etanol**

El etanol (también llamado en algunos casos como alcohol etílico) es un compuesto orgánico, pertenece al grupo de los alcoholes de fácil accesibilidad.<sup>47</sup>

Otras fuentes de etanol de primera generación incluyen materias primas con alto contenido de almidón, como cereales, tubérculos y rizomas.<sup>48</sup>

Se emplean para la obtención de etanol fuentes que contiene grados de almidón como materia prima para el proceso de obtención de etanol, que además involucran procesos subyacentes que permitirán su correcta producción.<sup>42</sup>

El etanol, o alcohol etílico, es un líquido incoloro e inflamable que se obtiene de dos maneras: (a) a través del método tradicional de fermentación de azúcares y (b) mediante el proceso químico de hidratación del etileno. Sin embargo, solo el etanol producido por el método tradicional se considera un biocombustible, ya que se deriva de la biomasa.<sup>49</sup>

Como se menciona el etanol es un componente que deber ser manejo con precaución debido a su principal característica de ser inflamable, al ser un producto de libre compra y venta, mantiene su ficha técnica de seguridad y control.<sup>49</sup>

La producción de etanol se inicia con el proceso de fermentación, el cual produce una mezcla de etanol y agua con una concentración de etanol entre 4 % y 6 % molar. Esta mezcla se destila, logrando una concentración que no supera el 89.99 % molar de etanol a presión atmosférica. Sin embargo, el contenido de agua presente, aunque pequeño, puede ser perjudicial para los motores de combustión interna, ya que causa problemas de corrosión.<sup>50</sup>

*“El etanol tiene un gran impacto debido a sus propiedades físicas y químicas, dado que contiene oxígeno, lo cual propicia efectos obvios en la oxidación de las partículas.”<sup>51</sup>*

El etanol también es usado como solvente en el proceso de extracción de aceites esenciales, ya que el aceite obtenido presenta niveles más bajos de de ácidos grasos libres y fosfolípidos, ya que éstos pasan a la fase alcohólica durante el enfriamiento del extracto. Además, el salvado obtenido tiene un color más claro y un aroma mejorado en comparación con el obtenido con hexano.<sup>52</sup>

El etanol se está aplicando como materia prima de combustibles modernos, debido a la facilidad que obtención que tiene el mismo, ya sea de origen pético o de una gran variedad de fuentes naturales, en su mayoría de la caña de azúcar, esto se debe a que

el etanol obtenido de la caña de azúcar presenta una mejora en la detonación de combustibles, por lo cual se lo usa como aditivo.<sup>53</sup>

Pero este tipo de productos modernos, trae consigo la innovación de métodos y equipos, los cuales con el pasar del tiempo, reemplazaran a los métodos tradicionales para la obtención de etanol y fabricación de combustibles.<sup>54</sup>

*1.7.1 Componentes físicos y químicos.* El etanol es un líquido transparente, que tiene una facilidad para incendiarse, volátil y con un aroma distintivo.<sup>55</sup>

Tabla 1. Características físicas y químicas

Peso molecular	46.068
Fórmula molecular	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O
Fórmula molecular	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> OH
Densidad	0,7893 a 20°C
Punto de fusión	-114,1 °C
Punto de ebullición	78,5 °C
Solubilidad	soluble en agua y en la mayoría de disolvente orgánicos
Presión de vapor	7,9 kPa a 25°C
Límites de explosividad	Inferior 3,3 % y superior 19 %
Umbral de olor	84 ppm

Fuente:<sup>55</sup>

El alcohol etílico, cuando se usa industrialmente, sirve como disolvente para fármacos, plásticos, perfumes y cosméticos. También se emplea como antiséptico en cirugía, como materia prima, en síntesis, y para la preservación de especímenes fisiológicos y patológicos. El etanol desnaturalizado, que contiene aditivos como metanol, isopropanol o benceno, es altamente tóxico y no debe ser ingerido.<sup>56</sup>

El etanol se está usando para mejorar la calidad de los combustibles, aumentando el octanaje del mismo, lo cual permite que el vehículo tenga un mejor desempeño en carretera. *“El empleo de etanol como combustible mejora el octanaje de las gasolinas y reduce la producción de gases que generan el efecto invernadero.”*<sup>57</sup>

1.7.2 *Obtención de etanol.* “Para producir etanol se buscan materias primas de bajo costo como los residuos lignocelulósicos, cultivos agrícolas con alto contenido de almidón, algas y otras fuentes.”<sup>42</sup>

Un claro ejemplo de la obtención de etanol por fermentación es mediante de residuos o cáscaras de frutas como materia prima expuestas a experimentación, que, mediante ayuda de uso de levaduras, medios de fermentación y/o adicciones de otros suplementos dentro de un tiempo o período de experimentación regulado y controlado se produce etanol a diferentes grados de concentración.<sup>58</sup>

“El bioetanol (alcohol etílico o alcohol carburante), cuya fórmula química es  $C_2H_5OH$ , se obtiene vía fermentativa utilizando diversas fuentes, como por ejemplo la materia vegetal.”<sup>59</sup>

“Las tecnologías para la producción de etanol a partir de materias primas no alimentarias, principalmente a partir de complejos lignocelulósicos, todavía no han tenido un impacto significativo en este mercado de producción de combustible.”<sup>60</sup>

1.7.3 *Obtención de etanol mediante torres de destilación.* A medida que se reduce la cantidad de alcohol en la mezcla con agua, el punto de ebullición aumenta debido a que la presión de vapor del agua es menor que la del alcohol. Los vapores generados por la ebullición de estas soluciones alcohólicas tienen una mayor concentración de alcohol en comparación con la solución original de la que provienen.<sup>61</sup> “La destilación como método de separación de mezclas alcohólicas es un proceso complicado, sobre todo en presencia de agua. Debido a que el agua es un compuesto polar, la mezcla de alcoholes forma diversos azeótropos los cuales dificultan la separación de estas sustancias.”<sup>62</sup>

No es posible obtener alcohol etílico puro a través de la destilación de soluciones acuosas, puesto que una mezcla con un 95.57% de alcohol forma un azeótropo que hierve a 77.65°C, una temperatura inferior a la del alcohol etílico puro.<sup>63</sup> “La torre de destilación tiene un rehervidor que realiza el calentamiento de la base de la torre con vapor saturado seco, el rehervidor contiene una mezcla de agua y alcohol.”<sup>64</sup>

1.7.4 *Usos de Etanol.* El etanol tiene una variedad de usos en diferentes sectores, siendo uno de los biocombustibles más utilizados a nivel mundial.<sup>65</sup> Algunos de sus usos más comunes son:

*1.7.4.1 Combustible para vehículos.* Es empleado como aditivo en la gasolina para reducir las emisiones de gases contaminantes, principalmente en mezclas de hasta un 10% de etanol con gasolina.<sup>66 67</sup>

*1.7.4.2 Combustible para transporte público.* Muchos autobuses y vehículos de transporte público utilizan mezclas de etanol como parte de su combustible.<sup>67</sup>

*1.7.4.3 Industria química.* El bioetanol se utiliza en la producción de productos químicos, como disolventes, desinfectantes y productos de limpieza.<sup>60</sup>

*1.7.4.4 Industria farmacéutica.* Se utiliza en la producción de ciertos medicamentos y productos farmacéuticos.<sup>14</sup>

*1.7.4.5 Producción de bebidas alcohólicas.* El bioetanol también se utiliza en la producción de bebidas alcohólicas como el vodka y algunos licores.<sup>68</sup>

*1.7.4.6 Generación de energía eléctrica.* Se puede utilizar en centrales eléctricas para generar electricidad.<sup>69</sup>

## **1.8 Azeótropos**

Un azeótropo es un compuesto o mezcla de dos o más sustancias acuosas que, en medidas concretas, actúan como si se tratase de un solo compuesto al momento de la destilación.

La formación de azeótropos está relacionada con la desviación de la idealidad de las mezclas líquidas. Esta desviación se expresa mediante el coeficiente de actividad de cada componente.<sup>70</sup>

Hay dos tipos principales de azeótropos:

*1.8.1 Azeótropos positivos.* “Tienen un punto de ebullición más bajo que el de cualquiera de los componentes puros. Un ejemplo común es la mezcla de etanol y agua al 95% de etanol.”<sup>71</sup>

1.8.2 Azeótropos negativos. “Tienen un punto de ebullición más alto que el de cualquiera de los componentes puros. Un ejemplo es la mezcla de ácido clorhídrico y agua al 20,2% de HCl.”<sup>72</sup>

La presencia de azeótropos puede complicar los procesos de destilación, ya que impide la separación completa de los componentes mediante la destilación convencional.<sup>71</sup>

### 1.9 Modelos matemáticos para eficiencia en destiladores

Los modelos matemáticos a través de los años han ido obteniendo mayor relevancia en los diferentes campos tecnológicos, científicos y académicos; esto debido a que su aplicabilidad facilita la investigación dado que nos brinda datos a partir de un sistema de ecuaciones.<sup>73</sup>

Tabla 2. Datos de equilibrio para el sistema etanol-agua a 1 atm. (x, y, fracciones molares de etanol).

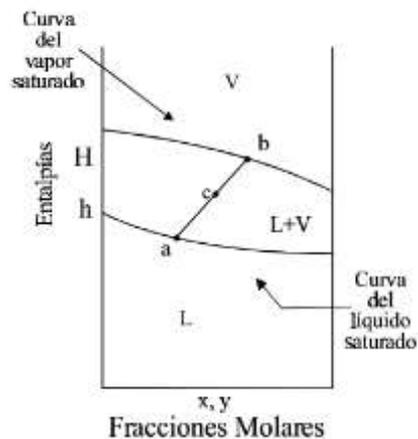
T(°C)	95.5	89	86.7	85.3	82.7	81.5	79.8	79.3	78.41	78.15
X	0.019	0.072	0.096	0.124	0.23	0.32	0.50	0.57	0.74	0.894
y	0.17	0.389	0.427	0.47	0.54	0.58	0.65	0.68	0.78	0.894

Fuente: <sup>2</sup>

1.9.1 Modelo matemático 1. (Ponchon Savarit) “El método gráfico de Ponchon-Savarit relaciona de una manera rigurosa todas las variables que intervienen en el cálculo de una columna de rectificación, teniendo en cuenta las variaciones de las entalpías en función de la composición, tanto del líquido como del vapor.”<sup>74</sup>

“Para aplicar este método, es necesario el diagrama entalpía-composición de las mezclas en un rango de temperaturas que incluya las composiciones de las fases líquida y vapor, manteniendo la presión de destilación constante.”<sup>74</sup>

Figura 5. Diagrama de equilibrio entalpía-composición para un sistema binario.



Fuente:<sup>74</sup>

En el método de *Ponchon-Savarit* se comienza el cálculo a partir de la composición del vapor que sale del primer piso de la columna (empezando a contar desde la cabeza) y se va alternando: las relaciones de equilibrio se utilizan para vincular el vapor que sale de un piso,  $V(j,k)$  con el líquido en equilibrio con él, que también sale del mismo piso,  $L(j,k)$ . Además, los balances de materia y entalpía entre cada piso y la cabeza de la columna permiten relacionar las corrientes que se cruzan entre dos etapas consecutivas:  $L(j-1,k)$  y  $V(j,k)$ .<sup>75</sup> Por lo tanto, para correlacionar la composición de una corriente de vapor con la del líquido que desciende del piso superior, se debe realizar un balance de materia entre el piso  $j$  de una zona  $k$  y el condensador (representado por la línea punteada en la figura).<sup>75</sup>

$$V(j, k) + \sum_{s=0}^{k-1} A(s) = L(j-1, k) + \sum_{s=0}^{k-1} P(s) + D \quad (8)$$

Donde:

$V(j, k)$  = es el caudal (másico o molar) del vapor que abandona el piso  $j$  de la zona  $k$ .

$L(j-1, k)$  = es el caudal del líquido que abandona el piso  $j-1$  de la zona  $k$ .

$D$  = es el caudal de destilado.

**1.9.2 Modelo matemático 2. (McCabe-Thiele.)** En el año de 1958, McCabe y Thiele proponen una perspectiva gráfica, denominada como el método de McCabe-Thiele, es considerado uno de los más simples e ilustrativos para el análisis de la destilación

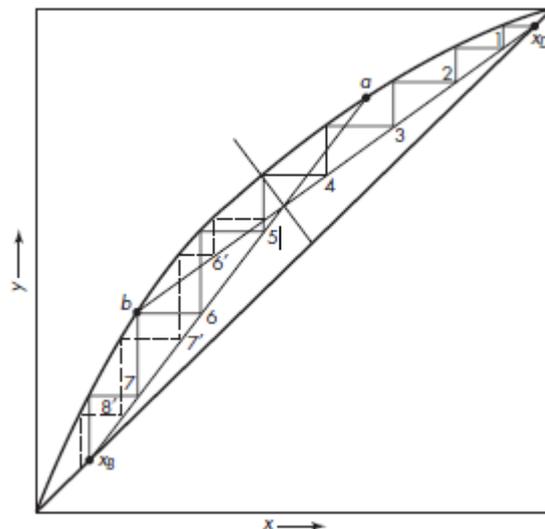
fraccionada binaria. Este método se fundamenta en que la composición de cada plato teórico está completamente definida por la fracción molar de uno de los dos componentes en el destilado.<sup>76</sup>

El método de McCabe-Thiele se basa en el supuesto de desbordamiento molar constante, que requiere que:

- “Los calores molares de vaporización de los componentes de la alimentación sean iguales, de manera que cada mol de líquido vaporizado condense un mol de vapor.”<sup>76</sup>
- “Los efectos térmicos, como los calores de disolución y la transferencia de calor hacia y desde la columna de destilación, se consideren despreciables.”<sup>76</sup>

Este método utiliza balances de materia en partes específicas de la columna para generar las líneas de operación, así como la curva de equilibrio  $y-x$  para el sistema.<sup>76</sup>

Gráfica 1. Localización del plato óptimo de alimentación.



Fuente:<sup>10</sup>

### 1.10 Eficiencia de la torre de destilación

Es una longitud de la eficacia de la relación entre el líquido y el vapor en un lugar específico del plato. Indica el desprendimiento real que se produce en un elemento distintivo de volumen (punto) en equiparación con la separación teórica que se alcanzaría si se lograra el equilibrio.<sup>77,78</sup>

$$E_{OG} = \frac{Y_n - (Y_n - 1)}{Y_n^* - (Y_n - 1)} \quad (9)$$

Donde:

$E_{OG}$  = Eficiencia puntual (adimensional).

$Y_n$  = Fracción molar de un componente en el vapor que abandona un punto dado del plato n.

$Y_n - 1$  = Fracción molar de un componente en el vapor que entra a un punto dado del plato n (viniendo del plato n-1).

$Y_n^*$  = Fracción molar de un componente en el vapor, el cual estaría en equilibrio con el líquido en un punto dado del plato n.

*1.10.1 Eficiencia del plato (Murphree),  $E_{MV}$ .* La eficiencia del plato ( $E_{MV}$ ) mide la efectividad del contacto a lo largo de todo el plato. Representa la separación real obtenida en el plato en comparación con la separación teórica que se lograría si el plato alcanzara el equilibrio.<sup>61</sup>

Está definida en términos de composiciones promedio hacia y desde el plato completo:

$$E_{MV} = \frac{Y_n - (Y_n - 1)}{Y_n^* - (Y_n - 1)} \quad (10)$$

Donde:

$E_{MV}$  = Eficiencia del plato (Murphree, vapor) (adimensional).

$Y_n$  = Fracción molar promedio de un componente en el vapor que entra al plato n (viniendo desde el plato n-1).

$Y_n^*$  = Fracción molar de un componente en el vapor. El cual estaría en equilibrio con el líquido que sale del plato n.

*1.10.2 Eficiencia global,  $E_0$ .* La eficiencia de los platos varía a lo largo de la columna debido a que las propiedades de transferencia de masa cambian con la composición, el flujo y la temperatura. Generalmente, la eficiencia de los platos en la parte inferior y superior de la columna tiende a ser significativamente baja, debido a las pequeñas variaciones en la concentración de los componentes en cada plato.<sup>79</sup> "Para evitar inconsistencias, se recomienda utilizar una eficiencia única para toda la columna o para cada sección de la misma."<sup>80</sup> La eficiencia global mide la efectividad de una columna o de una sección de la misma. Se utiliza comúnmente para calcular el número real de platos necesarios.<sup>87</sup> La eficiencia global se determina dividiendo el

número total de platos teóricos requeridos por el número total de platos reales necesarios para alcanzar la separación deseada.<sup>80,81</sup>

## **1.11 Eficiencia**

La eficiencia de una torre de destilación fraccionada se evalúa principalmente en términos de dos aspectos clave: la separación de componentes y la eficiencia energética. Aquí te explico cada uno en detalle:

### *1.11.1 Eficiencia de Separación*

Se refiere a la capacidad de la torre para segmentar eficazmente los compuestos de una muestra. Esto se logra mediante la creación de múltiples etapas de vaporización y condensación, donde los compuestos con puntos de ebullición más bajos tienden a concentrarse en la parte superior de la torre (destilado), mientras que los componentes con puntos de ebullición más altos se recogen en la parte inferior (residuo).<sup>39</sup>

La eficiencia de separación está determinada por el número de platos o etapas en la columna, la relación de reflujo (la cantidad de líquido condensado que se recircula en la columna) y las condiciones operativas (temperatura y presión).<sup>39</sup>

### *1.11.2 Eficiencia Energética*

Se refiere a la cantidad de energía requerida para operar la torre y separar los componentes deseados. Una torre de destilación eficiente minimiza el consumo de energía al optimizar la relación de reflujo y las condiciones de operación.<sup>77</sup>

Aspectos como el diseño de la torre (embalaje o platos), el uso de tecnologías de intercambio de calor eficiente, y la selección adecuada de solventes y productos químicos de proceso también afectan la eficiencia energética.<sup>79</sup>

Para evaluar la eficiencia global de una torre de destilación fraccionada, se utilizan indicadores como el número de platos teóricos requeridos para la separación deseada, el consumo específico de energía por unidad de producto separado, y la capacidad de la torre para manejar variaciones en la alimentación y las condiciones de proceso.

## 1.12 Factores que afectan la eficiencia de una torre de destilación

Existen diversos tipos de procesos que se pueden denominar destilación; la mayoría de ellos llegan a tener similitudes, pero también algunos presentan diferencias notables, así mismo su eficiencia se verá regida a las diversas consideraciones a tomar; algunas de ellas son: destilación, absorción, destilación extractiva, destilación tipo batch, etc.

Existen varias opciones de equipos de destilación para cada una de estas operaciones, la elección de cuál utilizar depende de 1) la presión, 2) el potencial de contaminación, 3) la proporción de densidad líquido-vapor, 4) carga del líquido y, lo más importante, 5) costo del ciclo de vida.<sup>82</sup>

La eficiencia de una torre de destilación puede verse afectada por una variedad de factores, que se pueden agrupar en categorías relacionadas con el diseño de la torre, las condiciones operativas, las propiedades de la mezcla a separar y el mantenimiento y operación de la torre.

### 1.12.1 Diseño de la Torre

Tipo de Platos o Rellenos: El diseño y tipo de platos (como platos de burbujeo, platos de válvula) o rellenos (relleno aleatorio, relleno estructurado) influyen en la eficiencia del movimiento de masa entre diferentes fases.<sup>83</sup>

Altura de la Columna: La altura del equipo determina el número de etapas disponibles con las que se podrá trabajar.<sup>84</sup>

Diámetro de la Columna: Un diámetro adecuado permite un flujo equilibrado de vapor y líquido, evitando problemas de carga y trayectorias no uniformes. .<sup>83</sup>

### 1.12.2 Condiciones Operativas

Temperatura y Presión: Estas condiciones afectan la volatilidad de los componentes y, por lo tanto, la eficiencia de la separación.<sup>83</sup>

Razón de Reflujo: Una mayor razón de reflujo generalmente mejora la pureza del producto, pero puede disminuir la eficiencia energética.<sup>84</sup>

Velocidad del Vapor: La velocidad a la que el vapor asciende por la columna puede afectar la eficiencia de la transferencia de masa.<sup>85</sup>

Carga de Alimentación: La cantidad y el punto de entrada de la alimentación pueden influir en la eficiencia de la separación.<sup>84</sup>

### *1.12.3 Propiedades de la Mezcla*

Composición de la Alimentación: La proporción de los componentes en la mezcla influye en la dificultad de la separación.<sup>86</sup>

Volatilidad Relativa: Cuanto mayor sea la diferencia en la volatilidad relativa de los componentes, más fácil será su separación.<sup>83</sup>

Impurezas y Contaminantes: La presencia de impurezas puede afectar negativamente la eficiencia de la torre.<sup>54</sup>

### *1.12.4 Mantenimiento y Operación*

Limpieza y Mantenimiento Regular: La acumulación de residuos o contaminantes puede obstruir los platos o rellenos, disminuyendo la eficiencia.<sup>87</sup>

Condiciones de Operación Estables: Mantener condiciones estables y controladas evita fluctuaciones que pueden reducir la eficiencia.<sup>84</sup>

Monitoreo y Control: El uso de sistemas de control avanzado y monitoreo continuo puede optimizar la operación de la torre.<sup>87</sup>

## **1.13 Descripción del proceso**

*1.13.1 Alimentación.* La alimentación de la mezcla Etanol-Agua se da por medio del vaciamiento del recipiente al destilador.<sup>85</sup>

*1.13.2 Calentamiento.* En esta etapa del procedimiento, se ubicará un quemador a gas por debajo del tanque de almacenamiento para así poder aumentar la temperatura de la sustancia dentro del contenedor, alcanzando su punto de ebullición. A continuación, se comienza con la separación y recuperación del etanol de la mezcla.<sup>85</sup>

*1.13.3 Regulación de la temperatura.* Una vez que se inicia el calentamiento, se procede a llevar un control constante de la temperatura a la cual se separará la mezcla. Para ello, se utiliza un termostato acoplado a la torre de destilación.<sup>83</sup>

1.13.4 *Condensación*. En esta fase, el etanol en forma gaseosa pasa por los condensadores, los mismos que estarán encargados de llevar nuevamente al estado líquido con la ayuda del agua en recirculación.<sup>85</sup>

### 1.14 Manual de Diseño de Proceso (PDVSA)

Es importante destacar que las normas específicas pueden variar según la aplicación del etanol y la región geográfica. Además, la eficiencia de un destilador binario puede evaluarse no solo en término de la calidad del producto final, sino también en aspectos como la eficiencia energética y la sostenibilidad, para los cuales pueden existir normas específicas en diferentes industrias.

Hasta la presente fecha no existe una normativa específica que certifique la eficiencia de un destilador binario para la producción de etanol agua. Para validar la eficiencia del equipo, se usará el Manual de Diseño de Proceso MDP-04-CF-14 de la empresa Petróleos de Venezuela, SA (PDVSA); la cual tiene como objetivo determinar la eficiencia de los platos mediante cálculo.

El documento nos brinda información sobre el porcentaje de eficiencia mínimo con el cual debería de contar los diversos equipos usados no solo en la destilación binaria, sino también en procesos de craqueo de petróleo, gas, entre otros.

Tabla 3. Eficiencia global de diseño

Proceso	Tipo de Columna	Eficiencia global de diseño $E_0$	
		Por encima de la alimentación	Por debajo de la alimentación
	2100 kPa abs		90–105*
	2800 kPa abs		85–100*
	– Ciclohexano/n-Heptano		
	30 kPa abs		70–75*
	165 kPa abs		80–90*
	245 kPa abs		85–95*
	– i-Octano/Tolueno		
	20 kPa abs		60–75*
	140 kPa abs		75–90*
	240 kPa abs		80–95*
Torres	– Etanol / Agua		60*
Misceláneas	– Isopropanol / Agua		60–90*
	– Despojador de aguas ácidas		40*

Fuente.<sup>88</sup>

### 1.15 GeoGebra

Para representar los valores obtenidos mediante calculo se usará GeoGebra, esto debido a que es un software de uso libre, no se necesita comprar una licencia para su uso; además de ser un programa muy didáctico lo que permite facilitar tanto la enseñanza como el aprendizaje de las personas que usan este software.<sup>89</sup>

La constante evolución de las diversas tecnologías ha facilitado la mayoría de las actividades cotidianas; y las actividades académicas no son ajenas a este continuo desarrollo tecnológico. *“Por consiguiente, la educación no debe ser indiferente a la tecnología y a todos los beneficios que esta puede aportar, por lo que es necesario integrar las herramientas digitales a la práctica docente y enriquecer la experiencia de aprendizaje en los estudiantes”*.<sup>90</sup> Por estos motivos, se escogió el software GeoGebra, debido a la facilidad de su uso y al ser de uso libre, no se debe de comprar una licencia para poder trabajar con el mismo, además de no contar con copyright y no generar problemas legales al momento de publicar cualquier trabajo.<sup>91</sup>

## 2. DISEÑO METODOLÓGICO PRELIMINAR

### 2.1 Sujeto o unidad de análisis

2.1.1 *Sujeto de estudio.* Como sujeto de estudio se tiene la base de datos y valores que se obtendrá a partir de los cálculos con modelos matemáticos, que proporcionará la eficiencia de la columna de destilación y por consiguiente validar los resultados con el “Manual de Diseño de Proceso MDP-04-CF-14 de la empresa Petróleos de Venezuela, SA (PDVSA)” a través de bases de datos mediante búsqueda bibliográfica.

2.1.2 *Tipo de investigación.* Este trabajo de investigación se realizará a través de estudios experimentales, analíticos y comparativos.

2.1.3 *Ubicación de la investigación.* El trabajo de investigación presenta como expectativa que los resultados obtenidos permitan obtener mejores resultados en las prácticas de laboratorio a través de la eficiencia de la columna de destilación de la UTMACH, a partir de la búsqueda de información en base de datos de artículos científicos.

### 2.2 Tipos de variables

2.2.1 *Variables Independientes.*

- Números de platos
- Temperatura de ebullición y condensación
- Selección de materiales
- Capacidad de separación

2.2.2 *Variables Dependientes.*

- Eficiencia de la columna de destilación (% de recuperación de etanol).

### 2.3 Objeto de estudio y muestra

2.3.1 *Objeto de Estudio.*

Columnas de destilación de un equipo sistema binario.

2.3.2 *Muestra.*

Mezcla de etanol-agua a diferentes concentraciones.

2.3.3 *Ubicación de las muestras.*

La presente investigación se realizará en el Continente Americano, ubicado en la parte noroccidental de Sudamérica, precisamente en Ecuador, en la provincia de El Oro, cantón Machala. La muestra que se tomará para esta investigación se encuentra

ubicada en Km.5 1/2 Via Machala Pasaje, que tendrá lugar en la Universidad Técnica de Machala.

## 2.4 Materiales, equipos y métodos

### 2.4.1 Materiales

Los reactivos, materiales y equipos utilizados en el presente trabajo de investigación, se describen a continuación:

Tabla 4. Materiales, equipos y reactivos

Reactivos	Materiales	Equipos
Etanol comercial. Agua destilada.	Pipeta graduada. Varilla de agitación Probetas de 100ml, 250ml, 500ml y 1000ml.	Columna de destilación Densímetro

Fuente: Elaborado por autores.

## 2.5 Métodos

Este proyecto se desarrollará en base al método analítico, método cuantitativo y al método experimental e investigativo.

En lo que corresponde al método analítico, se distinguirá los métodos de un fenómeno, como los procesos en una columna de destilación fraccionada y las normas a la que se rige dicho equipo al momento de operar, por medio de bibliografía se hará un análisis para determinar los parámetros de procesos respecto a la experimentación en el destilador.

De la misma manera, el método cuantitativo será demostrado mediante la cuantificación de las muestras a diferentes concentraciones, así mismo, la obtención de la efectividad teórica de los platos mediante cálculo matemático para poder comparar en base a la efectividad obtenida mediante una destilación real, el cálculo matemático se hará mediante la aplicación de la eficiencia de Murphree y la eficiencia global.

Para consiguiente el método experimental nos servirá para poder validar los cálculos previamente realizados y así finalmente se podrá obtener la eficiencia real a la que trabaja el destilador fraccionado de la Universidad Técnica de Machala.

Para finalizar, se hará mención al método investigativo, el cual nos permitirá mediante la búsqueda bibliográfica en bases de datos lograr una comparativa de los resultados que se obtendrán de nuestra investigación, conllevando si estos datos se encuentran dentro de los parámetros establecidos del "Manual de Diseño de Proceso MDP-04-CF-14 de la empresa Petróleos de Venezuela, SA (PDVSA).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para este estudio se planteó un volumen total de 20 litros para cada muestra, un porcentaje de etanol del 96% (valor rectificado con ayuda de los densímetros) y agua (Marca Ecuatoriana “Pure Water”) para los análisis.

Se seleccionó el etanol (Proveedor “Plasquimia”) con mayor grado de pureza para obtener resultados idóneos dentro de la destilación, que dicho valor se pudo constatar con el densímetro, facilitando su lectura. Por otra parte, el agua utilizada marca “Pure Water” fue seleccionada entre 4 muestras diferentes, que se muestran a continuación en la siguiente tabla y una breve explicación del por qué fue la más apropiada para ser utilizada dentro de estos análisis.

Los parámetros analizar para seleccionar la muestra de agua indicada son los siguientes:

Tabla 5. Parámetros de las diferentes muestras analizadas

Muestra de agua	pH	TDS (ppm)	EC (us/cm)
Agua de red	7.26	533	761
Agua destilada	7.00	0.11	0.15
“Pure Water”	6.74	0.1	236
“Vivant”	5.64	0.18	0.25

Fuente: Elaborado por autores.

- pH = Es una medida que refleja la acidez del agua. El rango va de 0 a 14, con 7 representando el valor neutro.<sup>92</sup>
- TDS (ppm) = Los sólidos disueltos totales incluyen sales, minerales, metales y otros compuestos en el agua. La OMS recomienda que el nivel de TDS en agua potable sea de 600 a 900 mg/l (o PPM).<sup>93</sup>
- EC (us/cm) = La capacidad de conducción eléctrica de un compuesto, medida en microsiemens por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), depende de las sales disueltas. La OMS establece un límite permisible de 1400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el agua potable.<sup>94</sup>

Luego del análisis de cada muestra de agua, se seleccionó “Pure Water” con un valor de pH de 6.74, TDS de 0.1 y EC de 236, siendo esta idónea dentro de los parámetros establecidos, encontrándose dentro de los límites permisibles y aceptables para ser parte del estudio dentro de la destilación.

### 3.1 Concentraciones etanol - agua

En relación con lo anterior, en este punto se da a conocer los cálculos y/o datos experimentales que se realizaron previo a la destilación, por consiguiente, se plantearon 3 muestras a diferentes concentraciones de porcentaje en peso (etanol - agua) los cuales se mencionan a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 6. Muestras de etanol a diferentes concentraciones

Muestras	% Etanol	% Agua
A	40	60
B	20	80
C	14	86

Fuente: Elaborado por autores.

### 3.2 Cálculo de las concentraciones de las muestras (mezclas)

Para realizar cada muestra y ser llevada a la torre de destilación, se realizó un cálculo porcentual previo del etanol, al no ser 100% puro, existen 4% de impurezas, que se deben ser consideradas al momento de realizar la mezcla binaria para su posterior destilación, por lo tanto, se emplea las siguientes fórmulas.

$$\% \text{ etanol} = 40\% - 20\% - 14\%$$

$$\% \text{ agua} = 60\% - 80\% - 86\%$$

$$\text{volumen de etanol} = (\text{volumen total}) * (\% \text{ etanol})$$

$$\text{volumen de agua} = (\text{volumen total}) * (\% \text{ agua})$$

Cabe recalcar que se tiene un 96% de pureza del etanol, sin embargo, necesitamos llevarlo a la pureza del 100% para obtener el valor con el 4% de impurezas agregadas por ello se rectifica ese dato con la siguiente fórmula:

$$\text{volumen etanol}_{100\%} = \frac{\text{volumen de etanol} * 100\%}{\text{porcentaje etanol inicial}}$$

$$\text{volumen total} = \text{volumen etanol}_{100\%} + \text{volumen de agua}$$

$$\text{volumen de agua} = \text{volumen total} - \text{volumen etanol}_{100\%}$$

En relación con lo anterior, en este trabajo se realizaron 3 repeticiones, de las cuales; la primera repetición (A1-B1-C1) se llevó a cabo a un porcentaje del 96% de etanol; la

segunda (A2-B2-C2) y tercera repetición (A3-B3-C3) fueron efectuadas a un porcentaje del 90% de etanol (mezcla de todos los alcoholes recuperados de la primera repetición). A continuación, se detallan los valores iniciales de etanol y agua en peso de cada muestra, para posteriormente ser llevados a la torre de destilación.

- **Mezcla binaria al 96% inicial (40% etanol – 60% agua)**

$$\text{volumen de etanol} = (20 \text{ litros}) * (0.4) = 8 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = (20 \text{ litros}) * (0.6) = 12 \text{ litros}$$

$$\text{volumen etanol}_{100\%} = \frac{8 \text{ litros} * 100\%}{96\%} = 8.333 \text{ litros}$$

$$\text{volumen total} = \text{volumen etanol}_{100\%} + \text{volumen de agua}$$

$$\text{volumen de agua} = 20 \text{ litros} - 8.333 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = 11.667 \text{ litros}$$

- **Mezcla binaria al 96% inicial (20% etanol – 80% agua)**

$$\text{volumen de etanol} = (20 \text{ litros}) * (0.2) = 4 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = (20 \text{ litros}) * (0.8) = 16 \text{ litros}$$

$$\text{volumen etanol}_{100\%} = \frac{4 \text{ litros} * 100\%}{96\%} = 4.167 \text{ litros}$$

$$\text{volumen total} = \text{volumen etanol}_{100\%} + \text{volumen de agua}$$

$$\text{volumen de agua} = 20 \text{ litros} - 4.167 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = 15.833 \text{ litros}$$

- **Mezcla binaria al 96% inicial (14% etanol – 86% agua)**

$$\text{volumen de etanol} = (20 \text{ litros}) * (0.14) = 2.8 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = (20 \text{ litros}) * (0.86) = 17.2 \text{ litros}$$

$$\text{volumen etanol}_{100\%} = \frac{2.8 \text{ litros} * 100\%}{96\%} = 2.9167 \text{ litros}$$

$$\text{volumen total} = \text{volumen etanol}_{100\%} + \text{volumen de agua}$$

$$\text{volumen de agua} = 20 \text{ litros} - 2.9167 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = 17.0833 \text{ litros}$$

- **Mezcla binaria al 90% inicial (40% etanol – 60% agua)**

$$\text{volumen de etanol} = (20 \text{ litros}) * (0.4) = 8 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = (20 \text{ litros}) * (0.6) = 12 \text{ litros}$$

$$\text{volumen etanol}_{100\%} = \frac{8 \text{ litros} * 100\%}{90\%} = 8.889 \text{ litros}$$

$$\text{volumen total} = \text{volumen etanol}_{100\%} + \text{volumen de agua}$$

$$\text{volumen de agua} = 20 \text{ litros} - 8.889 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = 11.111 \text{ litros}$$

- **Mezcla binaria al 90% inicial (20% etanol – 80% agua)**

$$\text{volumen de etanol} = (20 \text{ litros}) * (0.2) = 4 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = (20 \text{ litros}) * (0.8) = 16 \text{ litros}$$

$$\text{volumen etanol}_{100\%} = \frac{4 \text{ litros} * 100\%}{90\%} = 4.444 \text{ litros}$$

$$\text{volumen total} = \text{volumen etanol}_{100\%} + \text{volumen de agua}$$

$$\text{volumen de agua} = 20 \text{ litros} - 4.444 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = 15.556 \text{ litros}$$

- **Mezcla binaria al 90% inicial (14% etanol – 86% agua)**

$$\text{volumen de etanol} = (20 \text{ litros}) * (0.14) = 2.8 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = (20 \text{ litros}) * (0.86) = 17.2 \text{ litros}$$

$$\text{volumen etanol}_{100\%} = \frac{2.8 \text{ litros} * 100\%}{90\%} = 3.1111 \text{ litros}$$

$$\text{volumen total} = \text{volumen etanol}_{100\%} + \text{volumen de agua}$$

$$\text{volumen de agua} = 20 \text{ litros} - 3.1111 \text{ litros}$$

$$\text{volumen de agua} = 16.8889 \text{ litros}$$

### 3.4 Resultados de la destilación en base al peso – repeticiones

Estos valores obtenidos son rectificadas mediante los densímetros, los cuales nos ayudaron a verificar que el porcentaje obtenido de la mezcla sea el correcto (en función al % etanol).

Una vez rectificadas los valores, se realizaron las debidas mezclas a diferentes concentraciones y porcentajes, para posteriormente ser llevadas a la torre y obtener los resultados de cada una de las 3 repeticiones.

A continuación, se detallan estos valores mencionados en las siguientes tablas, para lo cual se obtuvieron por cada repetición, 3 envases de 500ml y consecutivamente se realizó una lectura del porcentaje de etanol recuperado por cada muestra obtenida.

Como dato adicional de este proceso de destilación, se menciona que se trabaja a una temperatura constante de 78°C dentro de la torre de destilación debido a que se encuentra establecida como la temperatura de ebullición del etanol.

Tabla 7. Muestra al 40% etanol – 60% agua

% Etanol inicial	% Recuperación de Etanol			Repetición	% Promedio
96	96	84	82	A1	87.333
90	90	82	82	A2	84.667
90	90	83	83	A3	85.333

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 8. Muestra al 20% etanol – 80% agua

% Etanol inicial	% Recuperación de Etanol			Repetición	% Promedio
96	96	83	82	B1	87.000
90	85	80	80	B2	81.667
90	85	82	82	B3	83.000

Fuente: Elaborado por autores

Tabla 9. Muestra al 14% etanol – 86% agua

% Etanol inicial	% Recuperación de Etanol			Repetición	% Promedio
96	93	82	82	C1	85.667
90	86	86	85	C2	85.667
90	87	85	83	C3	85.000

Fuente: Elaborado por autores.

### 3.5 Resultados de la destilación en base molar – repeticiones

Cabe recalcar, que los datos obtenidos son en porcentaje peso, sin embargo, para utilizarlo dentro del modelo matemático McCabe-Thiele, que es nuestro modelo a estudiar, estos valores deben ser llevados a porcentaje de base molar tanto para el etanol y agua, estos resultados obtenidos se presentan en las siguientes tablas y fórmulas a emplear:

$$\text{Masa molar etanol} = 46.068 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$\text{Masa molar agua} = 18.015 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

Teniendo en consideración que:

- $F$  = Flujo inicial o flujo de entrada.
- $x_F$  = Concentración inicial de etanol.
- $x_D$  = Concentración de destilado de etanol.
- $x_L$  = Concentración de residuo de etanol

Fórmulas para base molar de las concentraciones:

$$x_D = \frac{\frac{x_D \text{ etanol}}{m}}{\left(\frac{x_D \text{ etanol}}{m} + \frac{x_D \text{ agua}}{m}\right)}$$

$$x_F = \frac{\frac{x_F \text{ etanol}}{m}}{\left(\frac{x_F \text{ etanol}}{m} + \frac{x_F \text{ agua}}{m}\right)}$$

$$x_L = \frac{\frac{x_L \text{ etanol}}{m}}{\left(\frac{x_L \text{ etanol}}{m} + \frac{x_L \text{ agua}}{m}\right)}$$

El valor de  $X_{l \text{ etanol}}$  inicial, se toma su lectura a partir de la mezcla residual que queda dentro del tanque posterior al proceso de destilación.

Los valores molares de agua, son obtenidos a partir de la diferencia del valor del etanol con la unidad (1) que es valor máximo en base molar.

$$\text{moles totales} = \text{moles de etanol} + \text{moles de agua}$$

$$\text{moles totales} = 1$$

Para el valor de los flujos en base molar se emplea la siguiente fórmula en función al destilado:

$$F = F \left( \frac{x \text{ etanol}}{m} + \frac{x \text{ agua}}{m} \right)$$

$$D = F \left( \frac{x_F \text{ etanol} - x_L \text{ etanol}}{x_D \text{ etanol} - x_L \text{ etanol}} \right)$$

Luego de ello, el valor del otro flujo molar se puede obtener por diferencia, planteado la siguiente fórmula:

$$F = D + L$$

$$\text{Entrada} = \text{Destilado} + \text{Residuo}$$

Se plantean los resultados en base molar con las fórmulas mencionadas, que se dan a partir de los valores de las repeticiones realizadas por la destilación, obteniéndose un promedio por cada muestra.

Tabla 10. Muestra A1 (% peso)

Flujos	F	D	L
Masa (kg)	20		
x etanol	0.4	0.8733	0.1700
x agua	0.6	0.1267	0.8300

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 11. Muestra A1 (% molar)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	0.8398	0.1700	0.6698
x etanol	0.2068	0.7295	0.0742
x agua	0.7932	0.2705	0.9258

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 12. Muestra A2 (% peso)

Flujos	F	D	L
Masa (kg)	20		
x etanol	0.4	0.8467	0.1600
x agua	0.6	0.1533	0.8400

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 13. Muestra A2 (% molar)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	0.8398	0.1880	0.6518
x etanol	0.2068	0.6835	0.0693
x agua	0.7932	0.3165	0.9307

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 14. Muestra A3 (% peso)

Flujos	F	D	L
Masa (kg)	20		
x etanol	0.4	0.8533	0.1550
x agua	0.6	0.1467	0.8450

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 15. Muestra A3 (% molar)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	0.8398	0.1871	0.6527
x etanol	0.2068	0.6947	0.0669
x agua	0.7932	0.3053	0.9331

Fuente: Elaborado por autores.

Se realizó un promedio de la muestra A2 y A3 al tener el 90% de etanol inicial como un parámetro de igualdad, con la finalidad de presentar una gráfica de McCabe-Thiele promediada de estas dos muestras como material extra para análisis.

Tabla 16. Muestra A2-A3 (% molar promediada)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	0.8398	0.1875	0.6522
x etanol	0.2068	0.6891	0.0681
x agua	0.7932	0.3109	0.9319

Fuente: Elaborado por autores.

Siguiente muestra a continuación

Tabla 17. Muestra B1 (% peso)

Flujos	F	D	L
Masa (kg)	20		
x etanol	0.2	0.8700	0.1650
x agua	0.8	0.1300	0.8350

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 18. Muestra B1 (% molar)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	0.9750	0.0259	0.9410
x etanol	0.0891	0.7235	0.0717
x agua	0.9109	0.2765	0.9283

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 19. Muestra B2 (% peso)

Flujos	F	D	L
Masa (kg)	20		
x etanol	0.2	0.8167	0.1600
x agua	0.8	0.1833	0.8400

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 20. Muestra B2 (% molar)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	0.9750	0.0340	0.9410
x etanol	0.0891	0.6353	0.0693
x agua	0.9109	0.3647	0.9307

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 21. Muestra B3 (% peso)

Flujos	F	D	L
Masa (kg)	20		
x etanol	0.2	0.8300	0.1500
x agua	0.8	0.1700	0.8500

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 22. Muestra B3 (% molar)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	0.9750	0.0404	0.9346
x etanol	0.0891	0.6563	0.0646
x agua	0.9109	0.3647	0.9354

Fuente: Elaborado por autores.

Se realizó un promedio de la muestra B2 y B3 al tener el 90% de etanol inicial como un parámetro de igualdad, con la finalidad de presentar una gráfica de McCabe -Thiele promediada de estas dos muestras como material extra para análisis.

Tabla 23. Muestra B2-B3 (% molar promediada)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	0.9750	0.0372	0.9378
x etanol	0.0891	0.6458	0.0669
x agua	0.9109	0.3542	0.9331

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 24. Muestra C1 (% peso)

Flujos	F	D	L
Masa (kg)	20		
x etanol	0.14	0.8567	0.1350
x agua	0.86	0.1433	0.8650

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 25. Muestra C1 (% molar)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	1.0155	0.0037	1.0119
x etanol	0.0598	0.7003	0.0575
x agua	0.9402	0.2997	0.9425

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 26. Muestra C2 (% peso)

Flujos	F	D	L
Masa (kg)	20		
x etanol	0.14	0.8567	0.1250
x agua	0.86	0.1433	0.8750

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 27. Muestra C2 (% molar)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	1.0155	0.0109	1.0047
x etanol	0.0598	0.7003	0.0529
x agua	0.9402	0.2997	0.9471

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 28. Muestra C3 (% peso)

Flujos	F	D	L
Masa (kg)	20		
x etanol	0.14	0.8500	0.1200
x agua	0.86	0.1500	0.8800

Fuente: Elaborado por autores.

Tabla 29. Muestra C3 (% molar)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	1.0155	0.0147	1.0009
x etanol	0.0598	0.6891	0.0506
x agua	0.9402	0.3109	0.9494

Fuente: Elaborado por autores.

Se realizó un promedio de la muestra C2 y C3 al tener el 90% de etanol inicial como un parámetro de igualdad, con la finalidad de presentar una gráfica de McCabe -Thiele promediada de estas dos muestras como material extra para análisis.

Tabla 30. Muestra C2-C3 (% molar promediada)

Flujos	F	D	L
Masa (Kmol)	1.0155	0.0128	1.0028
x etanol	0.0598	0.6947	0.0518
x agua	0.9402	0.3053	0.9482

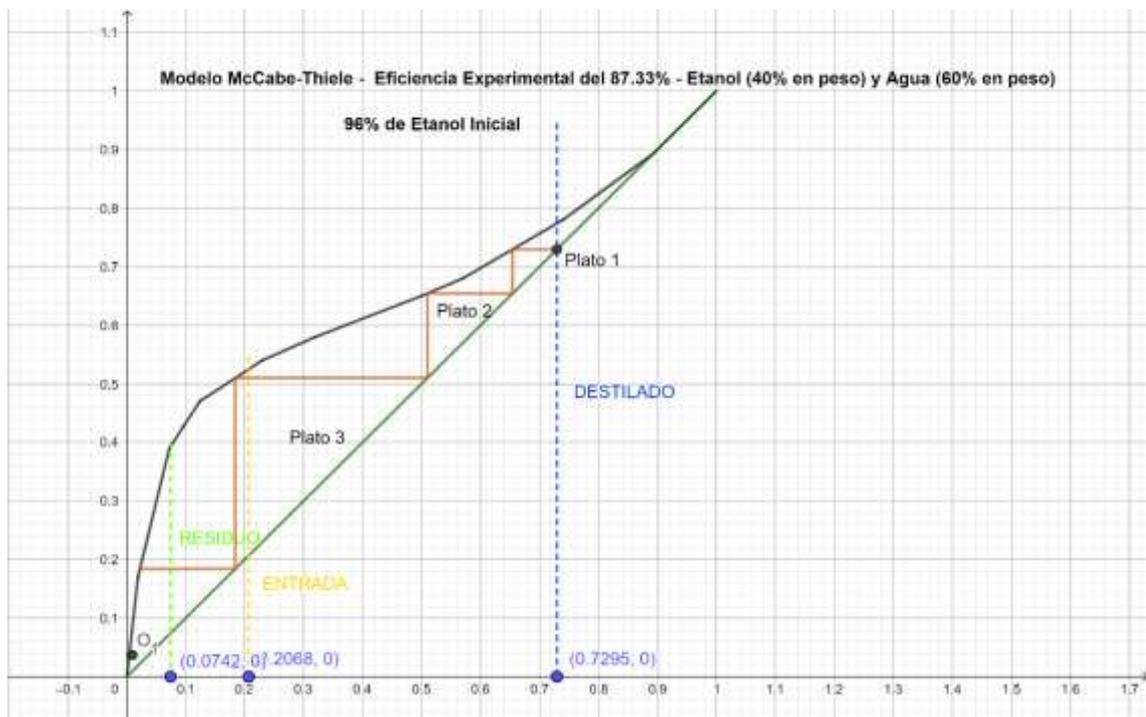
Fuente: Elaborado por autores.

A continuación, se menciona el modelo matemático McCabe -Thiele que se tomó en consideración para hacer nuestros análisis gráficos con los datos obtenidos a partir de la torre de destilación por cada muestra. Continuando con los resultados obtenidos en las tablas mencionadas con anterioridad, se procede a realizar el método gráfico con ayuda del modelo matemático descrito y su análisis respectivo por cada una de las repeticiones obtenidas.

### 3.6 Representación gráfica - Método de McCabe-Thiele

Graficar por el método de McCabe-Thiele con ayuda del programa de libre acceso GeoGebra, nos permite averiguar el número de etapas/platos que se encuentran dentro de la curva (etanol-agua), en referencia a los valores obtenidos de las repeticiones, con la finalidad de relacionarlo con la cantidad de etapas/platos reales de la torre de destilación (4), logrando así rectificar la eficiencia en cada una de las muestras, y comparándola con la norma establecida para eficiencias en columnas de destilación con cierto número de etapas.

Gráfica 2. Muestra A1



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.1 *Análisis de Muestra A1*. En esta muestra, nos indica un porcentaje de recuperación del 87.33% de etanol, como se detalla en la gráfica para una muestra al 40-60, en el cual sus resultados se pueden observar las etapas teóricas. Por ello se procede a realizar el siguiente cálculo para encontrar la eficiencia de la torre de destilación y además de rectificar dicha eficiencia con la norma para eficiencias PDVSA para validar esta torre.

$$Eficiencia = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

$$\text{número de etapas reales} = 4$$

$$PDVSA (\text{etanol} - \text{agua}) = 60\% \text{ eficiencia mínima}$$

Para obtener el número de etapas reales exactas, se emplea una regla de 3 con la ayuda del gráfico para definir los valores según una escala establecida para emplear en cada muestra.

La escala definida dentro de esta gráfica es de 0.01; sabiendo que cada cuadro equivale a un valor de 0.002, seguido de eso, se define el número de cuadros que se multiplicarán

por el valor mencionado (0.002), los cuales se delimitarán hasta la línea de concentración de residuo, a continuación, se explica a detalle cómo se obtienen el valor exacto de platos teóricos.

*Segmento de la etapa a encontrar = 0.16*

*Mitad del segmento de la etapa a encontrar = 0.08*

Como se observa, se debe tener el valor del segmento de la etapa a encontrar, seguido de eso se obtiene la mitad de dicho segmento, que nos ayudará a delimitar este valor como 0.5 etapas.

*0.08 → 0.5 etapas*

*(0.002 \* 13 cuadros) → x*

*x = 0.1625 etapas*

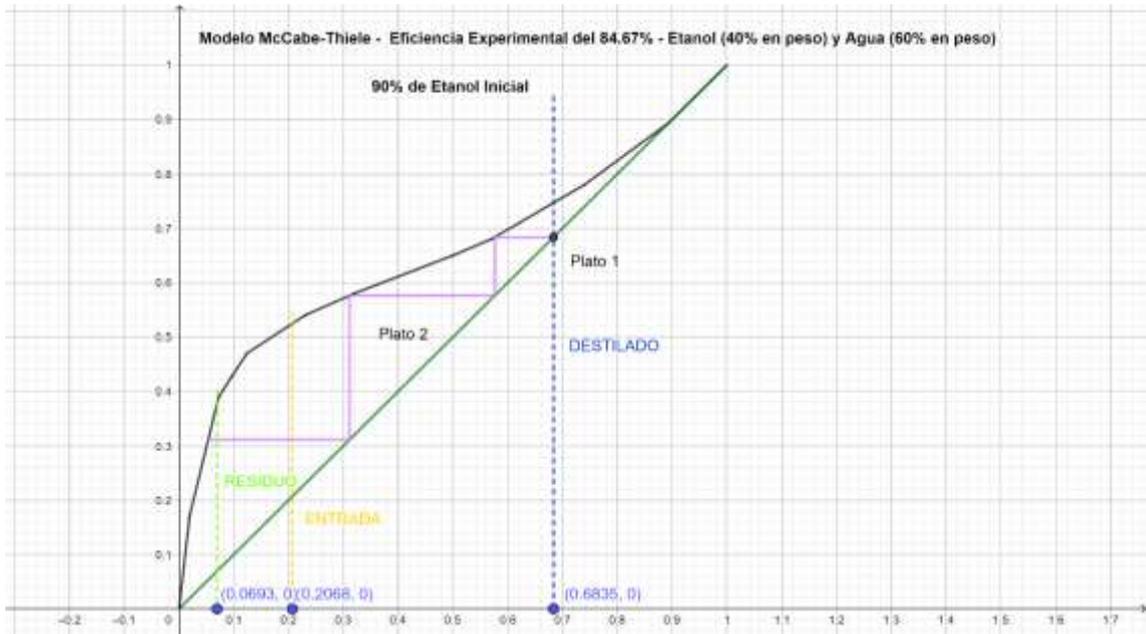
*etapas teóricas exactas = 0.5 + 0.1625 + 3*

*x = 3.6625 etapas*

$$Eficiencia = \frac{3.6625}{4} \times 100$$

*Eficiencia = 91.5625% > 60% eficiencia mínima*

Gráfica 3. Muestra A2



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.2 *Análisis de Muestra A2.* En esta muestra, nos indica un porcentaje de recuperación del 84.67% de etanol, como se detalla en la gráfica para una muestra al 40-60.

$$Eficiencia = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

número de etapas reales = 4

PDVSA (etanol – agua) = 60% eficiencia mínima

Segmento de la etapa a encontrar = 0.26

Mitad del segmento de la etapa a encontrar = 0.13

0.13 → 0.5 etapas

(0.002 \* 56 cuadros) → x

x = 0.4308 etapas

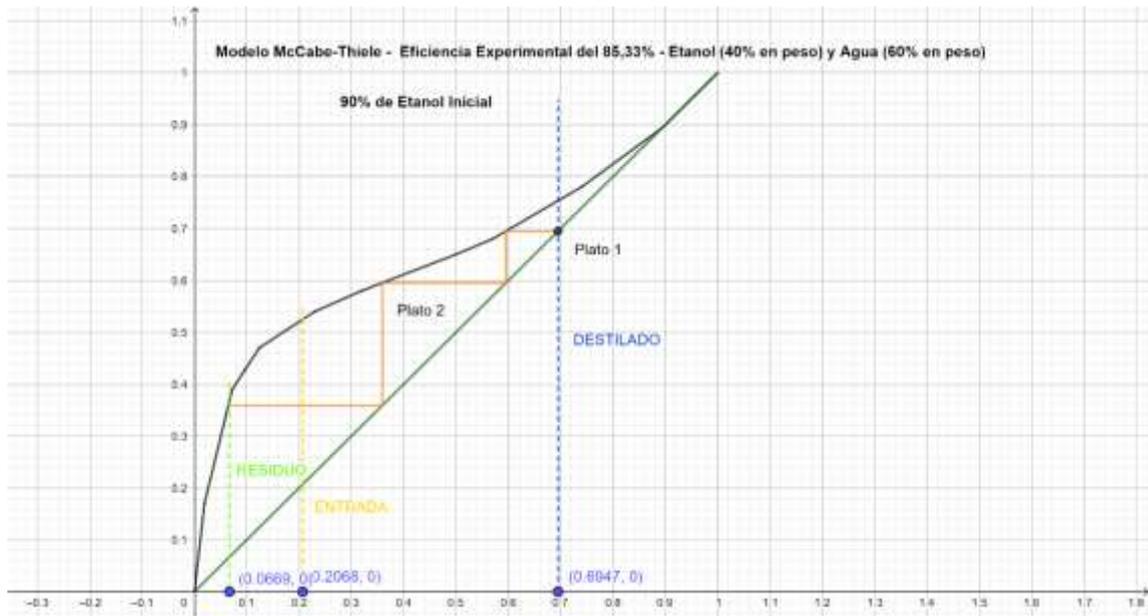
etapas teóricas exactas = 0.5 + 0.4308 + 2

x = 2.9308 etapas

$$Eficiencia = \frac{2.9308}{4} \times 100$$

Eficiencia = 73.27% > 60% eficiencia mínima

Gráfica 4. Muestra A3



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.3 *Análisis de Muestra A3.* En esta muestra, nos indica un porcentaje de recuperación del 85.33% de etanol, como se detalla en la gráfica para una muestra al 40-60.

$$Eficiencia = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

número de etapas reales = 4

PDVSA (etanol – agua) = 60% eficiencia mínima

Segmento de la etapa a encontrar = 0.29

Mitad del segmento de la etapa a encontrar = 0.145

0.145 → 0.5 etapas

(0.002 \* 67 cuadros) → x

x = 0.4621 etapas

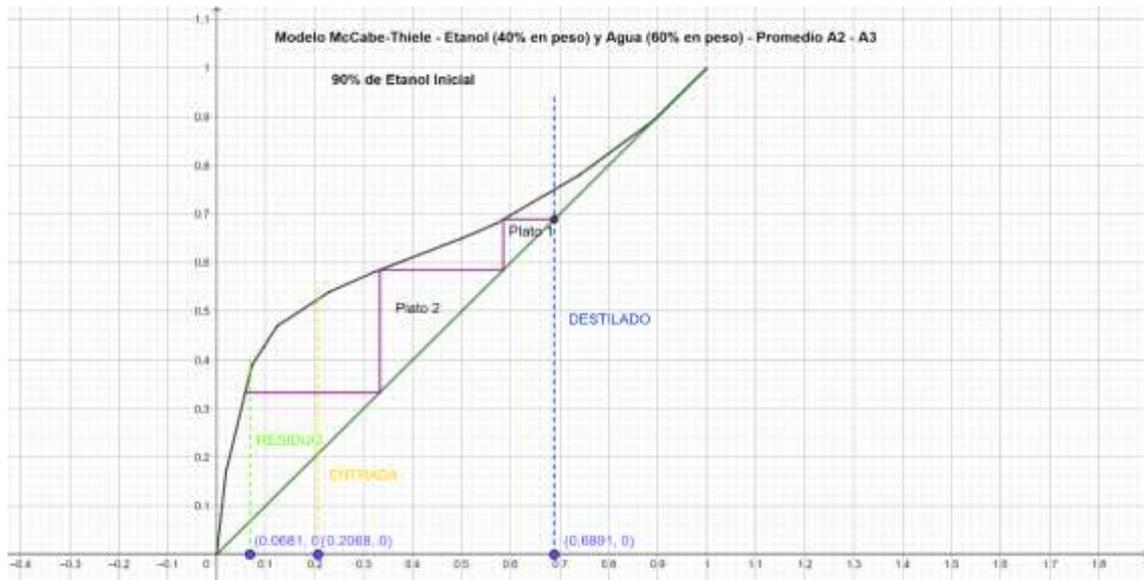
etapas teóricas exactas = 0.5 + 0.4621 + 2

x = 2.9621 etapas

$$Eficiencia = \frac{2.9621}{4} \times 100$$

Eficiencia = 74.0525% > 60% eficiencia mínima

Gráfica 5. Muestra Promedio A2-A3



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.4 *Análisis de Muestra A2-A3 promedio.* En esta gráfica nos indica el promedio de las muestras A2 y A3, como se detalla en la gráfica para una muestra al 40-60.

$$Eficiencia = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

$$\text{número de etapas reales} = 4$$

$$PDVSA (\text{etanol} - \text{agua}) = 60\% \text{ eficiencia mínima}$$

$$\text{Segmento de la etapa a encontrar} = 0.27$$

$$\text{Mitad del segmento de la etapa a encontrar} = 0.135$$

$$0.135 \rightarrow 0.5 \text{ etapas}$$

$$(0.002 * 63 \text{ cuadros}) \rightarrow x$$

$$x = 0.4667 \text{ etapas}$$

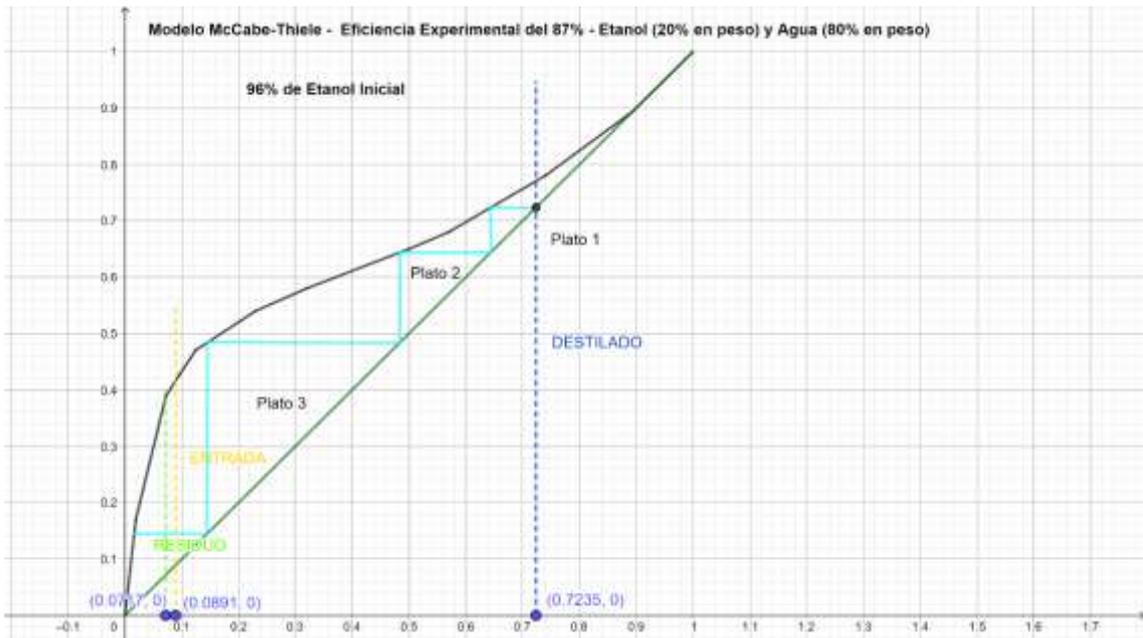
$$\text{etapas teóricas exactas} = 0.5 + 0.4667 + 2$$

$$x = 2.9667 \text{ etapas}$$

$$Eficiencia = \frac{2.9667}{4} \times 100$$

$$Eficiencia = 74.1675\% > 60\% \text{ eficiencia mínima}$$

Gráfica 6. Muestra B1



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.5 *Análisis de Muestra B1.* En esta muestra, nos indica un porcentaje de recuperación del 87.00% de etanol, como se detalla en la gráfica para una muestra al 20-80.

$$Eficiencia = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

$$\text{número de etapas reales} = 4$$

$$PDVSA (\text{etanol} - \text{agua}) = 60\% \text{ eficiencia mínima}$$

$$\text{Segmento de la etapa a encontrar} = 0.13$$

$$\text{Mitad del segmento de la etapa a encontrar} = 0.065$$

$$0.065 \rightarrow 0.5 \text{ etapas}$$

$$(0.002 * 4.5 \text{ cuadros}) \rightarrow x$$

$$x = 0.0692 \text{ etapas}$$

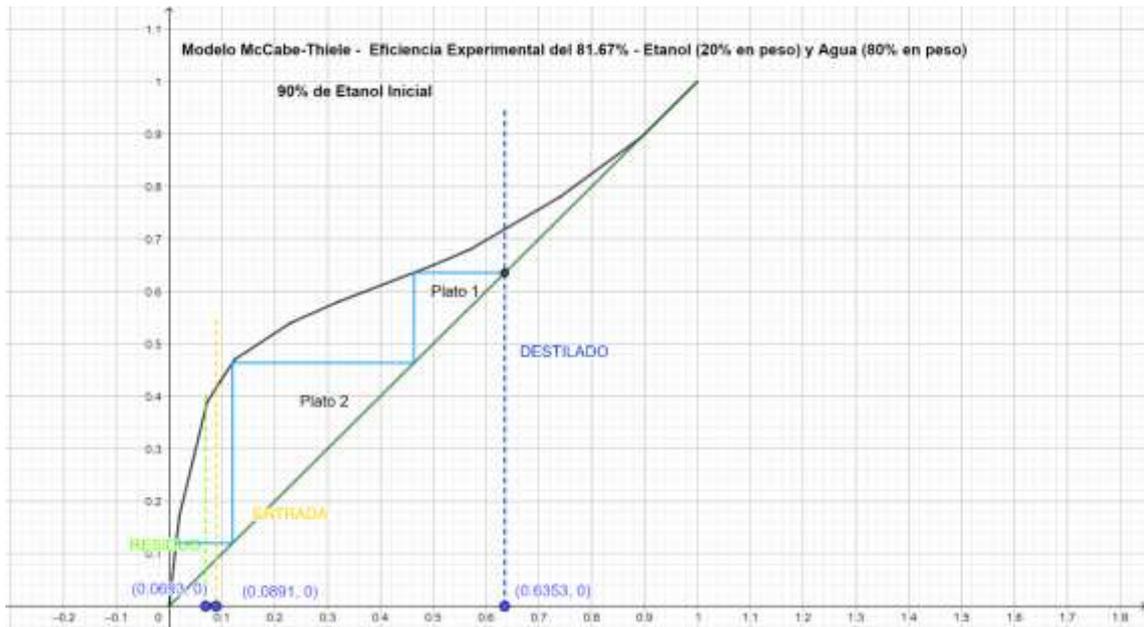
$$\text{etapas teóricas exactas} = 0.5 + 0.0692 + 3$$

$$x = 3.5692 \text{ etapas}$$

$$Eficiencia = \frac{3.5692}{4} \times 100$$

$$Eficiencia = 89.23\% > 60\% \text{ eficiencia mínima}$$

Gráfica 7. Muestra B2



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.6 *Análisis de Muestra B2*. En esta muestra, nos indica un porcentaje de recuperación del 81.67% de etanol, como se detalla en la gráfica para una muestra al 20-80.

$$Eficiencia = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

$$\text{número de etapas reales} = 4$$

$$PDVSA (\text{etanol} - \text{agua}) = 60\% \text{ eficiencia mínima}$$

$$\text{Segmento de la etapa a encontrar} = 0.11$$

$$\text{Mitad del segmento de la etapa a encontrar} = 0.055$$

$$0.055 \rightarrow 0.5 \text{ etapas}$$

$$(0.002 * 1 \text{ cuadros}) \rightarrow x$$

$$x = 0.01818 \rightarrow \text{negativo, debido que } x_L \text{ no se encuentra en la mitad del segmento.}$$

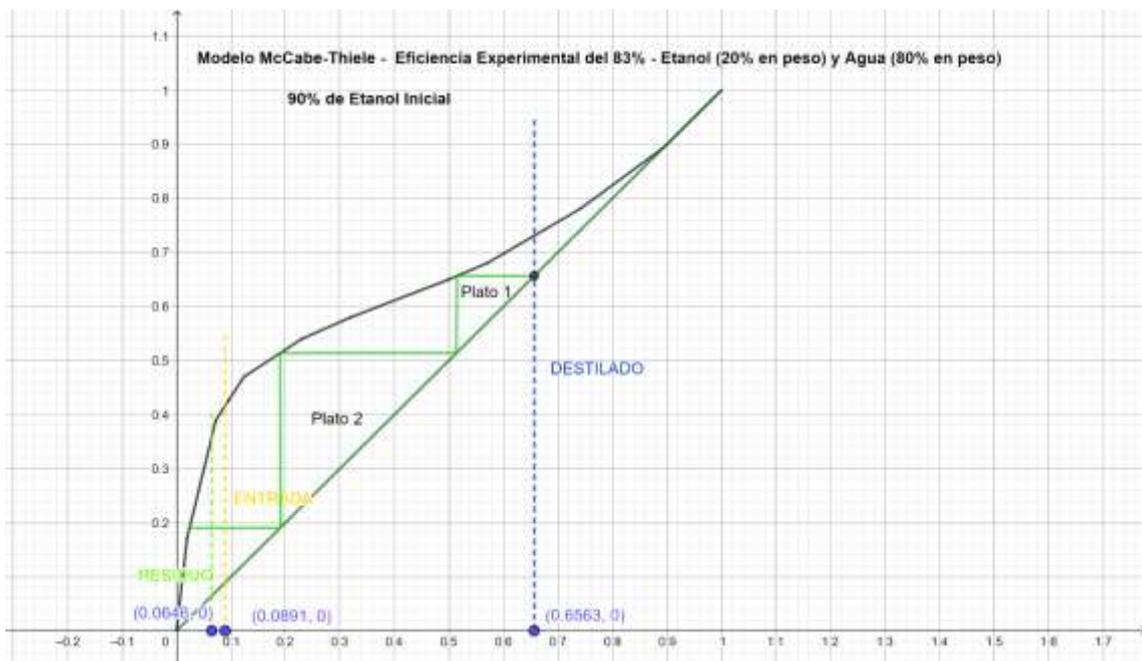
$$\text{etapas teóricas exactas} = 0.5 - 0.01818 + 2$$

$$x = 2.4818 \text{ etapas}$$

$$Eficiencia = \frac{2.4818}{4} \times 100$$

$$Eficiencia = 62.045\% > 60\% \text{ eficiencia mínima.}$$

Gráfica 8. Muestra B3



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.7 *Análisis de Muestra B3*. En esta muestra, nos indica un porcentaje de recuperación del 83.00% de etanol, como se detalla en la gráfica para una muestra al 20-80.

$$Eficiencia = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

$$\text{número de etapas reales} = 4$$

$$PDVSA (\text{etanol} - \text{agua}) = 60\% \text{ eficiencia mínima}$$

$$\text{Segmento de la etapa a encontrar} = 0.17$$

$$\text{Mitad del segmento de la etapa a encontrar} = 0.085$$

$$0.085 \rightarrow 0.5 \text{ etapas}$$

$$(0.002 * 22 \text{ cuadros}) \rightarrow x$$

$$x = 0.2588 \text{ etapas}$$

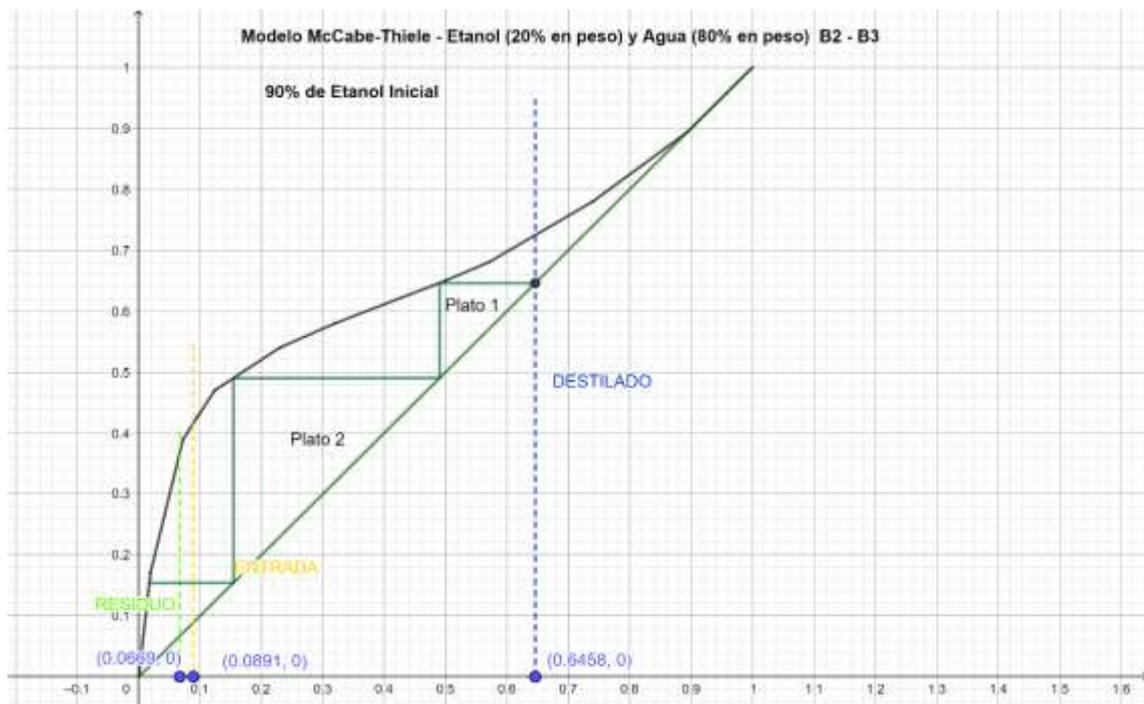
$$\text{etapas teóricas exactas} = 0.5 + 0.2588 + 2$$

$$x = 2.7588 \text{ etapas}$$

$$Eficiencia = \frac{2.7588}{4} \times 100$$

$$Eficiencia = 68.97\% > 60\% \text{ eficiencia mínima.}$$

Gráfica 9. Muestra Promedio B2-B3



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.8 *Análisis de Muestra B2-B3 promedio.* En esta gráfica nos indica el promedio de las muestras B2 y B3, como se detalla en la gráfica para una muestra al 20-80.

$$Eficiencia = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

número de etapas reales = 4

PDVSA (etanol – agua) = 60% eficiencia mínima

Segmento de la etapa a encontrar = 0.14

Mitad del segmento de la etapa a encontrar = 0.07

0.07 → 0.5 etapas

(0.002 \* 8.5 cuadros) → x

x = 0.1214 etapas

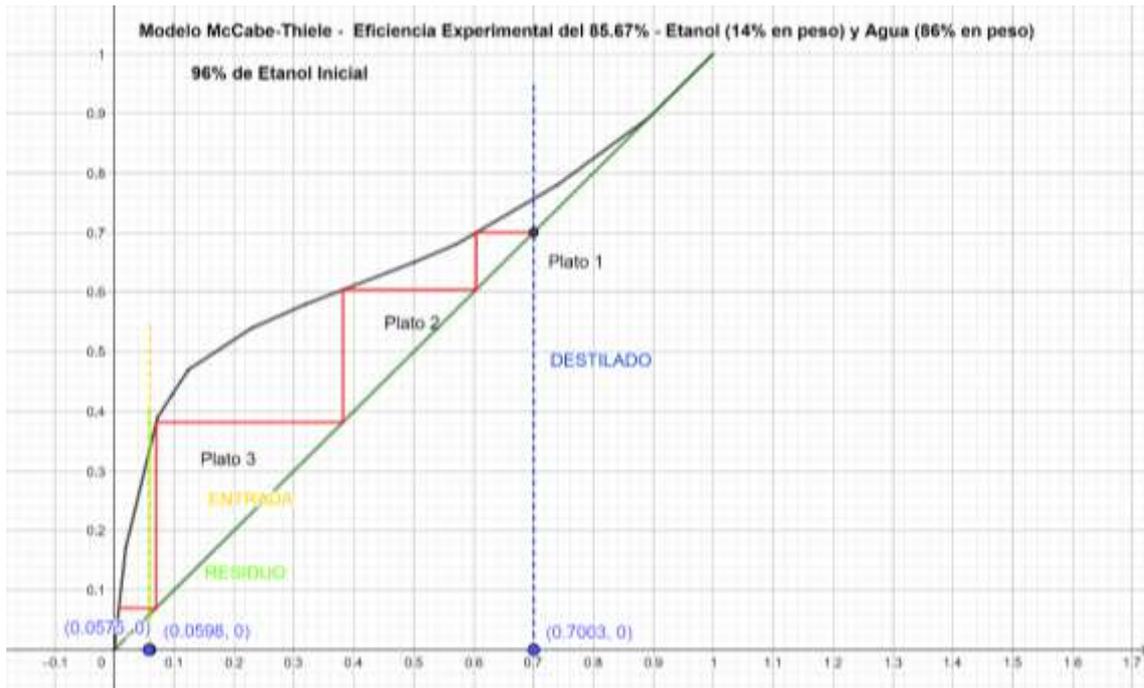
etapas teóricas exactas = 0.5 + 0.1214 + 2

x = 2.6214 etapas

$$Eficiencia = \frac{2.6214}{4} \times 100$$

Eficiencia = 65.535% > 60% eficiencia mínima.

Gráfica 10. Muestra C1



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.9 *Análisis de Muestra C1.* En esta muestra, nos indica un porcentaje de recuperación del 85.67% de etanol, detalla en la gráfica para una muestra al 14-86.

$$Eficiencia = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

$$\text{número de etapas reales} = 4$$

$$PDVSA (\text{etanol} - \text{agua}) = 60\% \text{ eficiencia mínima}$$

$$\text{Segmento de la etapa a encontrar} = 0.06$$

$$\text{Mitad del segmento de la etapa a encontrar} = 0.03$$

$$0.03 \rightarrow 0.5 \text{ etapas}$$

$$(0.002 * 9.8 \text{ cuadros}) \rightarrow x$$

$$x = 0.3267 \text{ etapas negativa, debido que } x_L \text{ no se encuentra en la mitad del segmento}$$

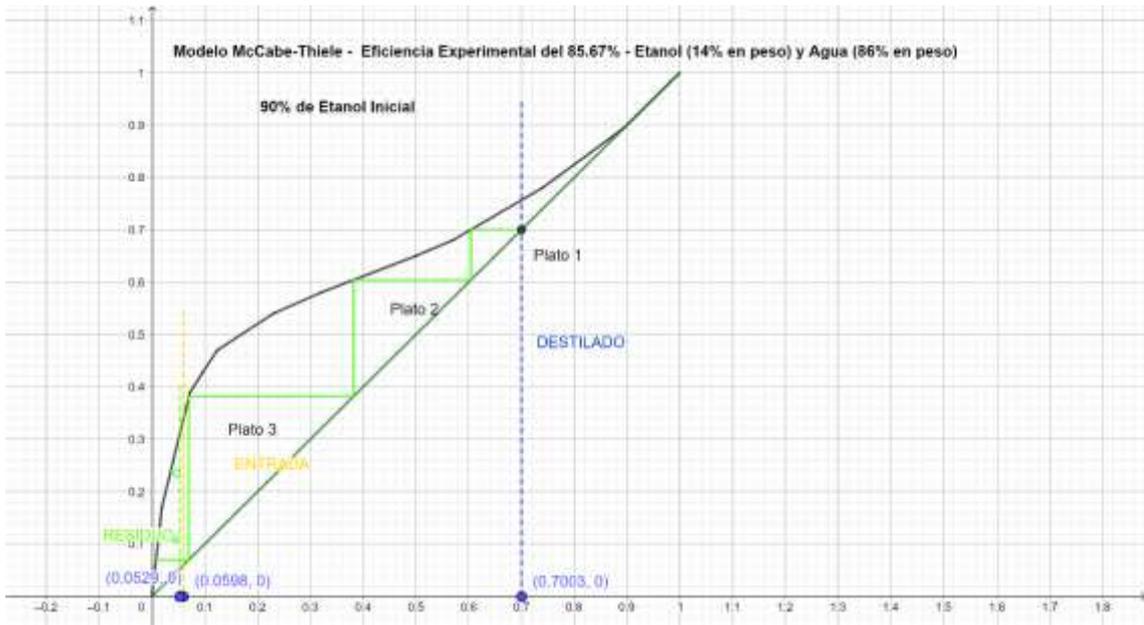
$$\text{etapas teóricas exactas} = 0.5 - 0.3267 + 3$$

$$x = 2.1733 \text{ etapas}$$

$$Eficiencia = \frac{3.1733}{4} \times 100$$

$$Eficiencia = 79.3325\% > 60\% \text{ eficiencia mínima.}$$

Gráfica 11. Muestra C2



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.10 *Análisis de Muestra C2*. En esta muestra, nos indica un porcentaje de recuperación del 85.67% de etanol, como se detalla en la gráfica para una muestra al 14-86.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

$$\text{número de etapas reales} = 4$$

$$\text{PDVSA (etanol - agua)} = 60\% \text{ eficiencia mínima}$$

$$\text{Segmento de la etapa a encontrar} = 0.06$$

$$\text{Mitad del segmento de la etapa a encontrar} = 0.03$$

$$0.03 \rightarrow 0.5 \text{ etapas}$$

$$(0.002 * 7,2 \text{ cuadros}) \rightarrow x$$

$$x = 0.2400 \text{ etapas negativa, debido que } x_L \text{ no se encuentra en la mitad del segmento}$$

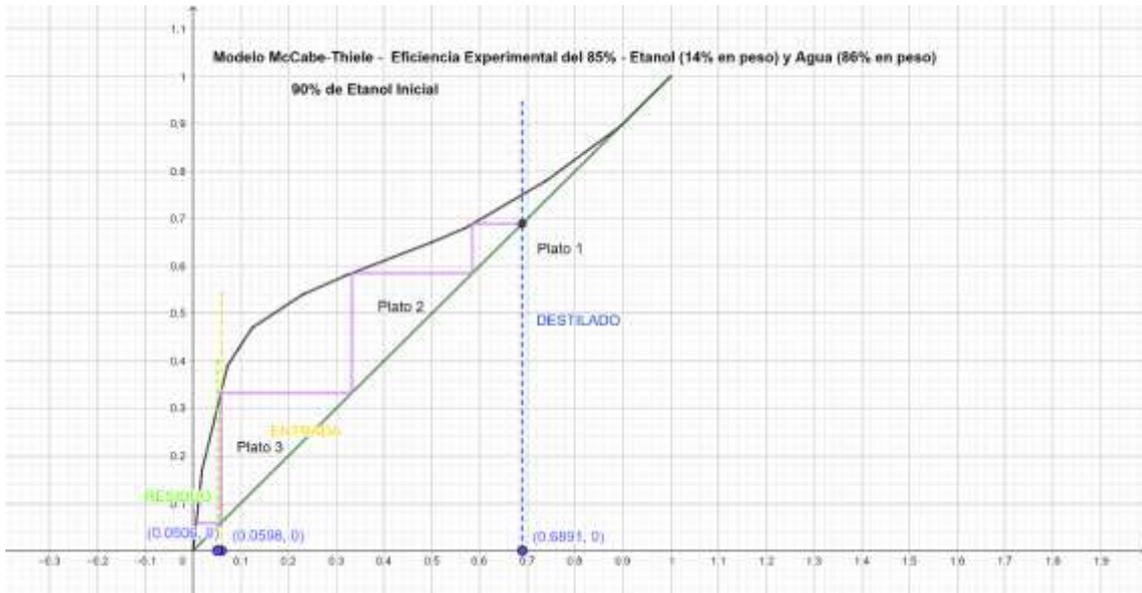
$$\text{etapas teóricas exactas} = 0.5 - 0.2400 + 3$$

$$x = 3.2600 \text{ etapas}$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{3.2600}{4} \times 100$$

$$\text{Eficiencia} = 81.50\% > 60\% \text{ eficiencia mínima.}$$

Gráfica 12. Muestra C3



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.11 *Análisis de Muestra C3*. En esta muestra, nos indica un porcentaje de recuperación del 85.00% de etanol, como se detalla en la gráfica para una muestra al 14-86.

$$Eficiencia = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

$$\text{número de etapas reales} = 4$$

$$PDVSA (\text{etanol} - \text{agua}) = 60\% \text{ eficiencia mínima}$$

$$\text{Segmento de la etapa a encontrar} = 0.05$$

$$\text{Mitad del segmento de la etapa a encontrar} = 0.025$$

$$0.025 \rightarrow 0.5 \text{ etapas}$$

$$(0.002 * 9.2 \text{ cuadros}) \rightarrow x$$

$$x = 0.3680 \text{ etapas negativa, debido que } x_L \text{ no se encuentra en la mitad del segmento}$$

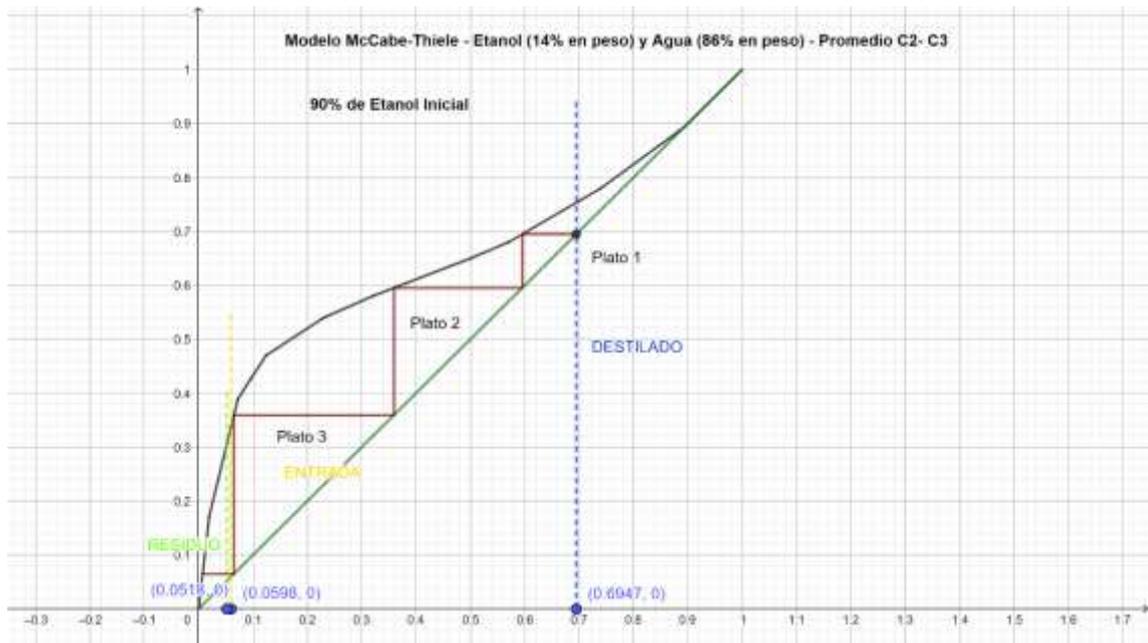
$$\text{etapas teóricas exactas} = 0.5 - 0.3680 + 3$$

$$x = 2.1320 \text{ etapas}$$

$$Eficiencia = \frac{3.1320}{4} \times 100$$

$$Eficiencia = 78.30\% > 60\% \text{ eficiencia mínima.}$$

Gráfica 13. Muestra Promedio C2-C3



Fuente: Elaborado por autores.

3.6.12 *Análisis de Muestra C2-C3 promedio.* En esta gráfica nos indica el promedio de las muestras C2 y C3, como se detalla en la gráfica para una muestra al 14-86.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{número de etapas teóricas}}{\text{número de etapas reales}} \times 100$$

número de etapas reales = 4

PDVSA (etanol – agua) = 60% eficiencia mínima

Segmento de la etapa a encontrar = 0.06

Mitad del segmento de la etapa a encontrar = 0.03

0.03 → 0.5 etapas

(0.002 \* 7,5 cuadros) → x

x = 0.250 etapas negativa, debido que  $x_L$  no se encuentra en la mitad del segmento

etapas teóricas exactas = 0.5 – 0.250 + 3

x = 2.250 etapas

$$\text{Eficiencia} = \frac{3.250}{4} \times 100$$

Eficiencia 81.25% > 60% eficiencia mínima.

#### 4. CONCLUSIONES

El estudio logró una evaluación exhaustiva de la eficiencia de la columna de destilación de la FCQS de la UTMACH, empleando un sistema binario de agua-etanol. Se demostró que la columna cuenta con los platos necesarios para operar eficientemente, cumpliendo con las normativas establecidas por la PDVSA (>60%). A través de un análisis meticuloso, se identificó el modelo matemático McCabe-Thiele para el análisis gráfico de este sistema, lo que permitió prever con precisión el comportamiento de la columna y optimizar su rendimiento.

Se llevaron a cabo pruebas con muestras de agua-etanol en proporciones de 60-40, 80-20 y 90-10, respectivamente, y los resultados obtenidos se mantuvieron dentro de los márgenes aceptados por la normativa PDVSA. Estos resultados también fueron validados mediante el cálculo de eficiencia utilizando el método de McCabe-Thiele, lo cual confirmó la eficacia del proceso de destilación. Este método proporcionó una confirmación gráfica del número de etapas teóricas necesarias, coincidiendo con los datos experimentales y asegurando un alto grado de confianza en las conclusiones. Además, los cálculos de eficiencia, permitieron validar las etapas teóricas que se encontraron de manera gráfica, con las etapas reales que proporciona la torre de destilación, logrando así, tener resultados eficientes.

Asimismo, al comparar con literatura relevante, se constató que los resultados son consistentes con estudios anteriores, reforzando la validez del método y el modelo matemático aplicado en esta investigación. Estos hallazgos no solo confirman la capacidad operativa de la columna bajo las condiciones establecidas, sino que también ofrecen una base firme para futuras mejoras y optimizaciones en los procesos de destilación en la UTMACH. La investigación resalta la importancia de considerar variaciones en la composición del sistema binario y su efecto en la eficiencia global de la columna.

Se recomienda continuar con investigaciones que exploren otros sistemas binarios y modelos matemáticos para mejorar la eficiencia y adaptabilidad de las columnas de destilación en diversas condiciones operativas. Además, la adopción de técnicas avanzadas de control podría optimizar aún más el rendimiento del sistema, contribuyendo al desarrollo de procesos industriales más sostenibles y eficientes.

## 5. RECOMENDACIONES

Para la optimización del diseño de la columna de destilación para mezcla etanol-agua, según los resultados obtenidos, se recomienda realizar estudios adicionales; pérdidas de calor, material de construcción, tipo de soldadura, disposición de los platos y relleno del mismo, con el objetivo de mejorar aún más la eficiencia en la separación de esta mezcla binaria.

Considerar la evaluación de concentraciones adicionales de etanol-agua; concentraciones mayores a 14% y menores al 40% de etanol, más allá de las proporciones estudiadas, para obtener una visión más completa del desempeño de la columna en un rango más amplio de condiciones.

Implementación de otros métodos de cálculo de eficiencia, como el método Ponchon-Savarit, que permitan verificar y rectificar valores con el método seleccionado, para determinar si existen alternativas que puedan ofrecer mejoras adicionales en la precisión de la predicción y en la eficiencia operativa.

Evaluar la durabilidad y mantenimiento de la columna de destilación, realizando estudios y requisitos de mantenimiento a lo largo del tiempo para asegurar que se mantenga eficiente y funcional con el uso prolongado.

La búsqueda continua de normativas de validación, permitirá la revisión de normativas adicionales actuales a la utilizada en este trabajo, que puedan permitir la validación de la eficiencia de las columnas de destilación para asegurar que los métodos y resultados obtenidos estén alineados con los estándares más actuales y relevantes en la industria.

Estudio de pérdidas de calor y mejoras, permitiendo los estudios detallados sobre las pérdidas de calor en la columna de destilación y explorar métodos para mejorar la eficiencia térmica. Esto podría incluir el análisis de aislamiento térmico, la optimización de la transferencia de calor y la implementación de técnicas para recuperar y reutilizar el calor en el proceso.

Implementación de un barómetro en la torre de destilación, el cuál permita la lectura de la presión interna de este equipo, facilitando nuevos análisis, que permitan mejorar el estudio de la eficiencia de esta columna.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Zapata Benabithé, Z.; Vanegas, D.; Rendon Montoya, J. C.; Velásquez, J. A. Caso de Estudio de la destilación etanol-agua en operación continua y discontinua y su simulación con ecuaciones cúbicas de estado y modelos de actividad. *Tecnológicas* [Online] 2020, 23 (49), 223–249. <https://doi.org/10.22430/22565337.1638>.
- (2) Marcilla Gomis, A.; Gómez Siurana, A.; García Cortés, A. N.; Cayuela Martínez, P. Introducción a Las Operaciones de Separación : Cálculo Por Etapas de Equilibrio [Online]; Universidad de Alicante, 1998. <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/4329>
- (3) Alejandro, D.; Acosta, S.; Reyes, L. H. Desarrollo y evaluación de un proceso de producción de licor a base de jugo de fique. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/ea5c5356-d4fe-4f8d-bc44-5ea7842fec64/content>
- (4) Mancio, A. A.; da Mota, S. A. P.; Ferreira, C. C.; Carvalho, T. U. S.; Neto, O. S.; Zamian, J. R.; Araújo, M. E.; Borges, L. E. P.; Machado, N. T. Separation and characterization of biofuels in the jet fuel and diesel fuel ranges by fractional distillation of organic liquid products. *Fuel* [Online] 2018, 215, 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.029>.
- (5) Operaciones Básicas en el Laboratorio de Química. Destilación. Glosario. Pàgina d'inici - Universitat de Barcelona Home Page, s. f. [https://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/destilacio\\_glosari.html](https://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/destilacio_glosari.html). (accessed January 29,2024).
- (6) da Mota, S. A. P.; da Mota, A. de A. M.; Machado, N. T. Influence of fractional distillation on the yield and quality of biofuels obtained through thermal catalytic cracking of crude palm oil. *DYNA (Colombia)* [Online] 2021, 88 (218), 62–71. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n218.90154>.
- (7) Tumbalam Gooty, R.; Chavez Velasco, J. A.; Agrawal, R. Methods to assess numerous distillation schemes for binary mixtures. *Chem. Eng. Res. Des.* [Online] 2021, 172, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.05.022>.
- (8) Córdova Mendoza, P.; Barrios Mendoza, T.; Zuzunaga Concha, E.; Zuzunaga Morales, R.; Córdova Barrios, I.; Diaz Huachuca, S. Vista de destilador solar de tipo una vertiente y la purificación de la calidad del agua,

- Ica \_ Revista Alfa. [Online] 2023, 7 (21), 511–529. <https://doi.org/https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i21.232>.
- (9) Santos, A.; Hernandez, E. Experimental evaluation of a single slope solar still. TECCIENCIA [Online] 2017, 12 (22), 63–71. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2017.22.7>.
- (10) McCabe, W. L.; Smith, J. C.; Harriott, P. H. Operaciones unitarias en ingeniería química, 7ª ed [Online].; McGraw-Hill: Ciudad de México, 2007. <http://librodigital.sangregorio.edu.ec/librosusgp/14698.pdf>
- (11) Aplicación de método de McCabe-Thiele a la rectificación de mezclas binarias. Universidad de Jaén, s. f. <https://www4.ujaen.es/~fespino/Proyecto/unidad2/unidad2.htm>
- (12) Atianashie Miracle A; Chukwuma Chinaza Adaobi. The application of computer science in fractional distillation of petroleum. International Journal of Frontline Research in Engineering and Technology [Online] 2022, 1 (1), 017–026. <https://doi.org/10.56355/ijfret.2022.1.1.0005>.
- (13) Azanza Lutsak, E. V.; Remache, A. M. Ósmosis inversa y destilación: análisis comparativo de la integración en plantas de potencia. Revista Científica y Tecnológica UPSE [Online] 2022, 9 (2), 1–18. <https://doi.org/10.26423/rctu.v9i2.700>.
- (14) Silvestre, W. P.; Medeiros, F. R.; Agostini, F.; Toss, D.; Pauletti, G. F. Fractionation of rosemary (*Rosmarinus Officinalis* L.) essential oil using vacuum fractional distillation. J Food Sci Technol [Online] 2019, 56 (12), 5422–5434. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04013-z>.
- (15) Muñoz González, J. F. Ensamble columna 4 pulgadas en acero inoxidable. MERVENTI: Máquinas y Equipos Home Page, s. f. <https://merventi.net/alambique-alcohol-ecuador/> (accessed January 29,2024).
- (16) Clark, J. Ley de Raoult y mezclas ideales de líquidos; 2022. [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Química\\_Física\\_y\\_Teórica/Termodinámica\\_Química\\_\(Suplemento\\_a\\_Shepherd,\\_et\\_al.\)/25:\\_Extensión\\_16\\_\\_Diagramas\\_de\\_fase\\_de\\_solución\\_de\\_vapor/25.01:\\_Ley\\_de\\_Raoult\\_y\\_Mezclas\\_Ideales\\_de\\_Líquidos](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Química_Física_y_Teórica/Termodinámica_Química_(Suplemento_a_Shepherd,_et_al.)/25:_Extensión_16__Diagramas_de_fase_de_solución_de_vapor/25.01:_Ley_de_Raoult_y_Mezclas_Ideales_de_Líquidos). (accessed January 30,2024).
- (17) Martínez-Costa, B. S. Una mirada fisicoquímica a la solubilidad del propano en n-formil morfolina y sulfolano. Revista ION [Online] 2022, 35 (2). <https://doi.org/10.18273/revion.v35n2-2022001>.

- (18) Pelayo Barbosa, D. A.; Gallego Badillo, R.; Pulido Suárez, D. C. El principio de Le Chatelier: Revisión de algunos libros de texto universitarios. *Plumilla Educativa* [Online] 2018, 21 (1), 29–57. <https://doi.org/10.30554/plumillaedu.21.2974.2018>.
- (19) Valencia I. Ley de solubilidad de Henry. Unidades de apoyo para el aprendizaje Home Page. <https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/8d27553f-ce35-44f7-82cd-ff4289cd3200/Contenido/index.html>. (accessed March 18,2024).
- (20) Valencia, I. Ley de Dalton. Unidades de apoyo para el aprendizaje Home Page. <https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/82b2e08f-1b24-41e2-ae4d-181fe1f17f2d/Contenido/index.html>. (accessed March 13,2024).
- (21) -Tinajero, G. Artículo de Revisión. Física y Anestesia (Primera Parte). *BJA Education* [Online] 2018, (30), 6-19. <https://doi.org/10.1016/j.bjae.2017.12.004>.
- (22) Tomás-Serrano, A.; Hurtado-Pérez, J. Determinación de la constante de los gases usando un manómetro y una balanza. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* [Online] 2020, 17 (3), 1–9. [https://doi.org/10.25267/Rev\\_Eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2020.v17.i3.3401](https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3401).
- (23) Ríos, A. Gases ideales: Brújula termodinámica. *Redalyc.org*, 2011. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84922622036>.
- (24) Sandoval Martínez, M. I.; Muñoz Navarro, S. F.; Martínez Jiménez, H. J. Estimación del equilibrio líquido-vapor del sistema binario acetona-cloroformo mediante el modelo termodinámico de Van Laar y Peng Robinson. *Revista ION* [Online] 2020. <https://doi.org/10.18273/revion.v33n2-2020004>.
- (25) Ceballos J, J. E.; Segura G Alexander R Peraza S, C. E.; Ceballos, J.; Eduardo Segura García, C. Diseño de columnas de destilación para sistemas binarios. *Enfoques tradicional e integrado* 2014; Vol. 39. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33931820003>.

- (26) Equipamiento, JM Home Page. El agua destilada., 16 de enero de 2023. <https://equipamientojm.com/todo-sobre-destiladores-de-agua/el-agua-destilada/>. (accessed January 29,2024)
- (27) Real Academia Española. Diccionario panhispánico de dudas Home Page. s. f. Disponible en: <https://www.rae.es/dpd/agua>. (accessed January 29,2024).
- (28) Zambrano Mero, J. D.; Delgado Párraga, A. G.; Zambrano Mero, E. T.; Peñaherrera Villafuerte, S. L. Contaminantes biológicos presentes en fuentes de agua del centro-sur de la provincia de Manabí, Ecuador. *Siembra* [Online] 2022, 9 (2), e4011. <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i2.4011>.
- (29) Camargo, A.; Camacho, J. Convivir con el agua. *Revista Colombiana de Antropología* [Online] 2019, 55 (1), 7–25. <https://doi.org/10.22380/2539472X.567>.
- (30) Carbotecnia Home Page. Agua para procesos industriales o uso industrial, 6 de febrero de 2023. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/agua-para-procesos-industriales/>. (accessed January 29,2024).
- (31) Mazzeo, Néstor; Zurbriggen, Cristina; Sciandro, José; Sciandro, José; Gadino, Isabel; Pérez, Daniel. Agua, ambiente y territorio: avances, barreras y desafíos en la gobernanza de los recursos hídricos. Disponible en: <https://redi.anii.org.uy/jspui/handle/20.500.12381/3121>
- (32) Escobar-Arrieta, S.; Albuja, A.; Andueza-Leal, F. D. Calidad fisicoquímica del agua de la laguna colta. Chimborazo. Ecuador. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo [Online] 2021, 11 (1), 80–90. <https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.3135>.
- (33) Solís-Castro, Y.; Zúñiga-Zúñiga, L. A.; Mora-Alvarado, D. La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha* [Online] 2018, 31 (1), 35. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>.
- (34) Jimenez Jumbo, L. D.; Arias Ramírez, B. J.; Arias Pastuna, M. A.; Reyes Cordova, Á. L. J. Relación empírica entre sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica en las piscinas de cultivo piscícola del centro experimental de investigación y producción amazónica de la Universidad Estatal Amazónica. *Technology Rain Journal* [Online] 2024, 3 (1). <https://doi.org/10.55204/trj.v3i1.e25>.

- (35) Quispe-Burga, B. L.; Azabache-Liza, Y. F. Relación del proceso de sedimentación de sólidos totales del agua residual y el estado de las redes de alcantarillado pluvial, Moyobamba. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas* [Online] 2022, 1 (1), e291. <https://doi.org/10.51252/reacae.v1i1.291>.
- (36) Barba-Gallardo, L. F.; Muñoz-Ortega, M. H.; Díaz-Parra, G. A.; Garzón de la Mora, P.; Ramírez-García, S. A.; Villafán-Berna, J. R. Determinación de ph por colorimetría en muestras pequeñas de lágrima. Método simple para medición en enfermedades oftalmológicas de la superficie ocular anterior. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* [Online] 2019, No. 76, 41–48. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2019761790>.
- (37) García, S. L.; Arguello, A.; Parra, R.; Pincay Pilay, M. Factores que influyen en el ph del agua mediante la aplicación de modelos de regresión lineal. *INNOVA Research Journal* [Online] 2019, 4 (2), 59–71. <https://doi.org/10.33890/innova.v4.n2.2019.909>.
- (38) Celi Sabando, K. D.; Morales Perea, D.; Correa Romero, E. J. Caracterización del ph en las principales fuentes hídricas con fines agrícolas del cantón Quinindé. *Tierra Infinita* [Online] 2022, 8 (1), 134–144. <https://doi.org/10.32645/26028131.1158>.
- (39) Centeno Satán, M.; Salcán León, B.; Padilla Muñoz, F. Obtención de alcohol etílico mediante fermentación y destilación del jugo de caña de maíz y el empleo en relleno en bombonería. *Pentaciencias* [Online] 2023, 5 (6), 545–555. <https://doi.org/10.59169/pentaciencias.v5i6.875>.
- (40) Ministerio de Sanidad y Consumo. Informe sobre alcohol; Rumagraf, S.A.: Madrid, febrero de 2007. Disponible en: <https://pnsd.sanidad.gob.es/profesionales/publicaciones/catalogo/catalogoPNSD/publicaciones/pdf/InformeAlcohol.pdf>
- (41) Suministro de especialidades. Alcohol etílico 96° potable; agosto de 2020. Disponible en: <https://suministro.com.mx/pdfs/873.pdf>
- (42) Alonso-Gómez, L. A. Materias primas usadas para la producción de etanol de cuatro generaciones: retos y oportunidades. *Agrociencia* [Online] 2018, 52 (7), 967–999. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952018000700967](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000700967)

- (43) Pidiscat Home Page, Alcohómetros. s. f. Disponible en: <https://www.pidiscat.cat/es/quimica/alcoholímetros>. (accessed February 24,2024).
- (44) ARTILAB Home Page, Alcoholímetro. s. f. Disponible en: <https://artilab.com.co/alcoholímetro/> (accessed February 24,2024).
- (45) De, M.; De Líquidos, D.; Hidrómetros, M.; Procesamiento, Y.; Digitales, D. I.; Manzano, L.; Manuel, J.; Gómez, C.; Anhel, K.; Santiago, B.; Omar, L.; Pérez, P.; Manuel, L. Memorias del XIX congreso internacional anual de la SOMIM, 2013 Pachuca, Hidalgo, México; 2013. Disponible en: <https://somim.org.mx/memorias/memorias2013/index.html>
- (46) Herbert Post Home Page, Comprender los hidrómetros: qué son y cómo funcionan. <https://trdsf.com/es/blogs/news/que-es-un-hidrometro-y-como-funciona>. accessed July 30,2024).
- (47) Canchig, D. Intento de crear una etiqueta de seguridad del etanol 1; Vol. 1. . Eur. J. Unimportant Chem. Matters [Online] 2022, 1. DOI: 10.5281/zenodo.6814716
- (48) Villacís-Tello, A. B.; Santiana-Espín, C. G.; Flores-Fiallos, L. M.; Guamán-Lozada, D. F. Diseño de un proceso industrial para la elaboración de una bebida alcohólica a partir del dulce de cabuya (Agave Americano). Polo Del Conocimiento [Online] 2021, 6 (63), n° 12. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i12.3452>.
- (49) Tunqui Quispe, C., Figueroa Dianderas, A. P., Tejada Flores, G., & Cjuro Farfán, I. d. R. (2018). Evaluación de la calidad del destilado alcohólico de anís verde (*Pimpinella anisum* L.) obtenido por destilación fraccionada. Revista de la Sociedad Química del Perú [Online] 2019, 85(2), 129–140. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v85i2.72>
- (50) Rodríguez Suárez, B., Pérez Ones, O., & Zumalacarregui, L. (2022). Evaluación de técnicas de deshidratación de etanol para la obtención de etanol anhidro aplicando simulación. Icidca sobre los derivados de la caña de azúcar, 56(3), 13. Disponible en: <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2023/03/articulo-6.pdf>
- (51) Coral-Bravo, J. D.; Álvarez-Jaramillo, E. R.; Tello-Guzmán, J. R. Uso del etanol para control y disminución de gases contaminantes en automotores.

- Polo del Conocimiento [Online] 2022, 7, 1768–1782. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i8>.
- (52) Silva, L. R. C.; Ribeiro, M. B. M.; Oliveira, A. D.; Silva, C. S.; Faria, É. V.; Santos, K. G. Destilação solar do solvente etanol proveniente da extração de óleo de coco. *Brazilian Journal of Development* [Online] 2019, 5 (12), 28964–28982. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n12-066>.
- (53) Tuárez Párraga, M. A.; Leonela, M.; Mero, L.; Judith, S.; Ochoa, B.; Geovanny, E.; Campozano, D. Evaluación de levaduras en la producción de etanol a partir de melaza de caña de azúcar. *ESPAMCIENCIA* [Online] 2020, 11 (2). [https://doi.org/10.51260/revista\\_espamciencia.v11i2.193](https://doi.org/10.51260/revista_espamciencia.v11i2.193).
- (54) Coral-Bravo, J. D.; Álvarez-Jaramillo, E. R.; Tello-Guzmán, J. R. Uso del etanol para control y disminución de gases contaminantes en automotores. *Polo del Conocimiento* [Online] 2022, 7 (8), 1768–1782. Doi: 10.23857/pc.v7i8
- (55) Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Documentación Toxicológica Para El Establecimiento Del Límite de Exposición Profesional de Etanol.; 2013. Disponible en: <https://www.insst.es/dlep-documentacion-toxicologica>
- (56) Mayra Janneth Centeno Satán. Obtención de alcohol etílico mediante el proceso de fermentación y destilación del jugo de caña de maíz (*Zea mays*) para el empleo como base de relleno en bombonería. *DSPACE ESPOCH* [Online] 2018. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/11755>
- (57) Barrera Flórez, N. A.; Jaimes Baquero, C. E. Análisis de sensibilidad para la destilación extractiva de etanol-agua empleando una mezcla de etilenglicol y  $\text{CaCl}_2$  como solvente. *América Revista Semilleros: Formación Investigativa* [Online] 2018, 4.
- (58) Barrera, R.; Ardila, A. N.; Murcia, J. F. Producción de etanol a partir de piñas de rechazo de cultivos del Chocó. *Revista ION* [Online] 2020, 33 (1). <https://doi.org/10.18273/revion.v33n1-2020005>.
- (59) Rosero, V. J. R.; Carrera, J. A.; Chimbo, J. E.; Pilco, C. J.; Guana, D. M. Obtencion de etanol a partir residuos agricolas obtaining of bioethanol from lignocellulosic agricultural waste. *Studies In Environmental And Animal Sciences* [Online] 2022, 3 (3), 1612–1631. <https://doi.org/10.54020/seasv3n3-023>.

- (60) Reyes Suarez, I. Y.; Morejon Mesa, D. Y.; Hernández Herranz, E. A. Evaluación termodinámica del empleo de mezclas etanol-gasolina en motores de encendido por chispa. *Rev. Cienc. Tec. Agropecu* [Online] 2020, 29 (2), 24–31. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v29n2/2071-0054-rcta-29-02-24.pdf>
- (61) Pérez Sánchez, A.; Pérez Sánchez, E. J.; Bodaño Hernández, M. G. Diseño de una columna empacada y una torre de bandejas perforadas para la absorción de etanol. 2. Diseño de la torre de bandejas perforadas. *Revista Mutis* [Online] 2020, 10 (1), 8–24. <https://doi.org/10.21789/22561498.1580>.
- (62) Rolando Guillén-Mendoza, N. I.; Beatriz Latorre-Castro III, G.; Antonio Moreira-Mendoza, C. I. Estudio termodinámico de mezclas metanol-agua ciencias técnicas y aplicadas artículos de investigación [Online] 2021, 6 (9), 1258–1269.  
DOI: 10.23857/pc.v6i9.3108
- (63) Espinal, M.; René, P.; Morales, W. J.; Aarón, K.; Arteaga, P.; Rainiero, F.; Castro, T.; Optar, P.; De, A. T. Diseño, construcción y validación de un equipo de destilación de alcohol etílico. Disponible en: <https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/1790/>
- (64) Eduardo García Jaimes, L.; David Rodríguez Acevedo, J. Optimización de los lazos de control de una torre de destilación mediante las librerías del controlador ac800m; 2015; Vol. 12. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=607863422003>.
- (65) Química, T.; Galiano Morell, A.; Quitio, C.; Revelo, L.; González, B.; Sánchez, R. Producción enzimática de biodiesel con biomasa lignocelulósica. *Tecnología Química* [Online] 2018, 38 (1). Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852018000100011](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000100011)
- (66) Llenque-Díaz, L. A.; Quintana, A.; Torres, L.; Segura, R. Bioethanol production from organic plant waste. *REBIOL* [Online] 2020, 40 (1), 21–29. <https://doi.org/10.17268/rebiol.2020.40.01.03>.
- (67) Castro, M. B.; Emiliozzi, A. L. El bioetanol en base a maíz y su inserción en cadenas de valor en la provincia de Córdoba, Argentina. *Redes* [Online] 2020, 25 (3), 1302–1321. <https://doi.org/10.17058/redes.v25i3.14054>.

- (68) Morales-Zamora, M.; Mesa-Garriga, L.; Ley-Chong, N.; Martínez, A. C. de A.; Acosta-Martínez, D. R.; González-Suárez, E. Estudios previo inversionistas para la producción de furfural-etanol y tableros a partir de bagazo de caña de azúcar. *Revista ION* [Online] 2021, 34 (2). <https://doi.org/10.18273/revion.v34n2-2021002>.
- (69) De Bernardi, L. A. Perfil del Azúcar. s. f. Disponible en: [https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss\\_mercados\\_agropecuarios/publicaciones/\\_archivos/000101\\_Perfiles/999981\\_Perfil%20del%20Azúcar%202019.pdf](https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_mercados_agropecuarios/publicaciones/_archivos/000101_Perfiles/999981_Perfil%20del%20Azúcar%202019.pdf). (accessed February 29,2024).
- (70) Pliego, J. R. Formation of azeotropes from the standpoint of solvation thermodynamics. *Quim Nova* [Online] 2022, 45 (3), 292–296. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170824>.
- (71) Ríos Santana, R. J. Avances en las tareas de experimentación, modelización y verificación de propiedades de disoluciones ester-alcano e influencia sobre procesos de separación; Resumen extendido de Tesis de doctorado, Universidad de Vigo, Vigo, 2019. <https://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/handle/11093/1515?show=full>
- (72) Lascano Núñez, R. E.; Carvajal Zurita, C. A.; Navas Enríquez, V. A.; Quimbita Benavides, M. F. Simulación y validación de un sistema de destilación para la separación de azeótropos de diisopropileter – isopropanol – agua en procesos mejorados para la industria química. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* [Online] 2023, 7 (4), 7093–7116. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i4.7464](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7464).
- (73) Blanco, T. F.; García Piqueras, M.; Manuel Diego-Mantecón Zaira Ortiz-Laso, J. Modelización matemática de la evolución de dos reactivos químicos; *Épsilon* [Online] 2019; Vol. 101, 1047-155. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/18184>
- (74) Antonio, J.; Labarta, R. Diseño de columnas de rectificación y extracción multicomponente. Cálculo del reflujo mínimo. Resumen de tesis de doctorado, Universidad de Alicante, Alicante 1998. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10023/1/Reyes-Labarta-Juan-Antonio.pdf>
- (75) Feijoo, G. Destilación binaria: método Ponchon Savarit. Colección “Notas en Enxeñaría Química” [Online] 2023. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17830.09288>.

- (76) Universidad de Jaén Home Page. Aplicación de método de McCabe-Thiele a la rectificación de mezclas binarias. <https://www4.ujaen.es/~fespino/Proyecto/unidad2/unidad2.htm>. (accessed 2024-02-13).
- (77) Narváez-García, A.; Torres-Díaz, A.; Robles-Heredia, J.; González-Nobles, E.; Torres-Díaz, A. Efecto del reflujo en la eficiencia termodinámica de la separación de una mezcla utilizando destilación discontinua. *JEEOS* [Online] 2017, 1 (1), 51-60. <https://doi.org/10.19136/jeeos.a1n1.1732>.
- (78) Chávez Salazar, F. A. Eficiencia del método de destilación en la obtención de diésel a partir de aceite automotriz usado en base a la norma astm d, en la ciudad de celendín; 2020. Disponible en: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3978?show=full>
- (79) Pérez Velázquez, V.; Lahera Portelles, F.; Rojas Rojas, V. M. Propuesta para lograr eficiencia energética en los procesos de destilación de alcohol. *Desarrollo sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación* [Online] 2023, 5 (50), 47–54. <https://doi.org/10.51896/rilcods.v5i50.364>.
- (80) Azanza Lutsak, E. V.; Remache, A. M. Ósmosis inversa y destilación: análisis comparativo de la integración en plantas de potencia. *Revista Científica y Tecnológica UPSE* [Online] 2022, 9 (2), 1–18. <https://doi.org/10.26423/rctu.v9i2.700>.
- (81) Rojas Alvarado, O. A.; Benavidez, J. F.; Pascuas, W. Cálculo de la efectividad global del equipo (OEE) basado en el concepto de gemelo digital bajo un entorno de transformación digital industrial. *Revista Mutis* [Online] 2023, 13 (2), 1–27. <https://doi.org/10.21789/22561498.2019>.
- (82) Kolmetz, K.; Ng, W. K.; Lee, S. H.; Lim, T. Y.; Summers, D. R.; Soya, C. A. Optimize distillation column design for improved reliability in operation and maintenance. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* [Online] 2007, 2 (4), 294–307. <https://doi.org/10.1002/apj.23>.
- (83) Pérez-Sánchez, A.; La Rosa-Veliz, M. I.; Sarduy-Rodríguez, Z. M.; Pérez-Sánchez, E. J.; Ranero-González, E. Diseño de una torre de bandeja perforada para la absorción de amoniaco. *Revista ION* [Online] 2023, 36 (2). <https://doi.org/10.18273/revion.v36n2-2023005>.
- (84) Borja Mayorga, D. F. Diseño y construcción de un sistema de enfriamiento de agua para la torre de destilación de thinner. *Ciencia Digital* [Online] 2019, 3 (2.4), 36–48. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.4.505>.

- (85) Pérez Sánchez, A.; Pérez Sánchez, E. J.; Bodaño Hernández, M. G. Z. Diseño de una columna empacada y una torre de bandejas perforadas para la absorción de etanol. 2. Diseño de la torre de bandejas perforadas. *Revista Mutis* [Online] 2020, 10 (1), 8–24. <https://doi.org/10.21789/22561498.1580>.
- (86) Manual de diseño de proceso; Petróleos de Venezuela 1997. Disponible en: <http://www.pdvsa.com/index.php?lang=es> (accessed January 15,2024).
- (87) Montaña, D. P. Uso de GeoGebra para generar aprendizajes significativos de las secciones cónicas. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* [Online] 2023, 4 (5). <https://doi.org/10.56712/latam.v4i5.1302>.
- (88) Lucas Avila, G. E.; Aray Andrade, C. A. Geogebra Como Herramienta Didáctica Para El Fortalecimiento Del Aprendizaje de Secciones Cónicas En Bachillerato. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS* [Online] 2023, 5 (5), 386–400. <https://doi.org/10.59169/pentaciencias.v5i5.747>.
- (89) Cedeño Menéndez, R. R.; Valdez Trejo, V. El uso de la GeoGebra como herramienta para el mejoramiento del rendimiento académico en estudiantes de bachillerato. *Polo del Conocimiento* [Online] 2022, 7 (2), 2412–2435. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i2.3776>.
- (90) Variable indicador agua. <http://www2.medioambiente.gov.ar/sian/chubut/trabajos/contagua.htm>  
<http://www.dmcca.es/documentum/publicaciones/manual2008.pdf>.
- (91) Significado de los sólidos disueltos totales en agua (TDS) - Carbotecnia. Carbotecnia Home Page, s. f. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/solidos-disueltos-totales-tds/>. (accessed July 31,2024).
- (92) Blog GrowMax Water Home Page, La importancia de controlar la EC del agua. s. f. <https://growmaxwater.com/blog/es/controlar-la-ec-del-agua/>. (accessed July 31,2024).

## 7. ANEXOS

Anexo A. Multiparámetro, mediciones de EC, pH y TDS para muestras de agua.



Fuente: Elaborado por autores.

Anexo B. Rectificación del %etanol con densímetros.



Fuente: Elaborado por autores.

Anexo C. Preparación de las muestras (agua-etanol)



Fuente: Elaborado por autores.

#### Anexo D. Destilación de la mezcla en la torre de fraccionamiento



Fuente: Elaborado por autores.

#### Anexo E. Torre de destilación en funcionamiento



Fuente: Elaborado por autores.

#### Anexo F. Temperatura idónea de 78°C para separación de la mezcla



Fuente: Elaborado por autores.

Anexo G. Verificación del %etanol recuperado de las muestras mediante densímetros



Fuente: Elaborado por autores.

Anexo H. Muestras del %etanol recuperado de las todas las repeticiones



Fuente: Elaborado por autores.

<b>INSTRUMENTO / EQUIPO</b>	<b>MARCA / PROVEEDOR</b>
Torre de destilación	Merventi – Máquinas y Equipos
Etanol 96% pureza	Productos “Plasquimia”
Agua potable	Pure Water
Densímetros	Marca China
Agua destilada	Agua destilada “LAB”
Multiparámetro	pH 686 – pH meter