

Diseño y simulación de configuraciones de destilación para el enriquecimiento de alcoholes amílicos a partir del residuo de aceite de fusel utilizando el software PRO/II Process Engineering V10.2

Ortiz Acosta, Karen Lissette

Departamento de Ciencias de Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Petroquímica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Petroquímica

Ing. Luna Ortiz, Eduardo David, MSc

18 de agosto del 2020



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Diseño y simulación de configuraciones de destilación para el enriquecimiento de alcoholes amílicos a partir del residuo de aceite de fusel utilizando el software PRO/II Process Engineering V10.2”** fue realizado por la señorita **Ortiz Acosta, Karen Lisette** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 18 de agosto de 2020

Luna Ortiz, Eduardo David MSc.

CC.: 180272491-2

REPORTE DE VERIFICACIÓN

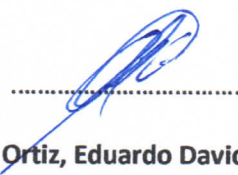
URKUND

Document Information

Analyzed document Tesis_Ortiz_Karen_Correcta.docx (D77900161)
 Submitted 8/18/2020 3:04:00 PM
 Submitted by Luna Ortiz Eduardo David
 Submitter email eduna@espe.edu.ec
 Similarity 3%
 Analysis address eduna.espe@analysis.urkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / ESCRITO TESIS.docx Document ESCRITO TESIS.docx (D47206162) Submitted by: cidonoso@espe.edu.ec Receiver: cidonoso.espe@analysis.urkund.com	8
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Borrador 3 Tesis Gabriel Villacrés.docx Document Borrador 3 Tesis Gabriel Villacrés.docx (D54218661) Submitted by: cidonoso@espe.edu.ec Receiver: cidonoso.espe@analysis.urkund.com	1
W	URL: https://docplayer.es/96589256-Universidad-de-guayaquil-facultad-de-ingenieria-quim... Fetched: 2/5/2020 7:05:18 AM	2
W	URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Acelite_de_fusel Fetched: 8/18/2020 3:05:00 PM	1
SA	tesis kertly Campoverde- Manuel Yunga.doc Document tesis kertly Campoverde- Manuel Yunga.doc (D25636368)	1
W	URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4329/1/Marcilla_Gomis_CXC3%A1iculo_por_et... Fetched: 7/26/2020 3:34:35 AM	1
W	URL: https://html.rincondelvago.com/quimica-industrial_2.html Fetched: 10/3/2019 2:50:10 AM	1
W	URL: https://docplayer.es/92809631-Escuela-politecnica-nacional.html Fetched: 1/7/2020 9:21:41 AM	1



Luna Ortiz, Eduardo David MSc.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Ortiz Acosta, Karen Lisette**, con cédula de ciudadanía n° 180460374-2, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y simulación de configuraciones de destilación para el enriquecimiento de alcoholes amílicos a partir del residuo de aceite de fusel utilizando el software PRO/II Process Engineering V10.2”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 18 de agosto de 2020

A handwritten signature in blue ink that reads 'Karen Ortiz' is written over a horizontal dotted line.

Ortiz Acosta, Karen Lisette

C.C.: 180460374-2



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Ortiz Acosta, Karen Lisette**, con cédula de ciudadanía n° 180460374-2, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño y simulación de configuraciones de destilación para el enriquecimiento de alcoholes amílicos a partir del residuo de aceite de fusel utilizando el software PRO/II Process Engineering V10.2”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, 18 de agosto de 2020

Ortiz Acosta, Karen Lisette

C.C.: 180460374-2

DEDICATORIA

A Dios, por ser fuente de fe, amor y esperanza.

Al recuerdo de mis abuelitos Carlos y Manuel. Sé que me cuidan.

A mis padres Napo y Marilín, por su amor, paciencia y cuidado.

A mis hermanos Carolina y Carlos, por ser mi guía y ejemplo de superación.

A mis abuelitas Emy y Rosa, por guardarme en sus oraciones.

A mi tío abuelo Humberto, por cuidarme como a una nieta.

A mis tías Priscila, Mery e Irene, por sus consejos, cariño y complicidad.

Karen Lissette Ortiz Acosta.

AGRADECIMIENTO

A la PhD. Nelly Flores por su tiempo y guía para la realización de la presente investigación.

A mi tutor Msc. David Luna y director de carrera PhD. Román Rodríguez, por compartir su conocimiento, experiencias y consejos brindados tanto en la vida profesional como personal.

A SODERAL S.A., en especial al Ing. Mario Aguilera por su predisposición, consideración y ayuda desinteresada.

A CODANA S.A., al Ing. Alejandro Veliz por su ayuda y experiencia profesional.

A mis amigos y amigas, por acompañarme a lo largo de mi carrera universitaria y hacer de esta aventura, una anécdota inolvidable.

A una persona muy especial, siempre estuvimos cerca desde el inicio, y con seguridad sé que no tendremos final.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA	1
CERTIFICACIÓN	2
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA.....	4
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	5
DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTO	7
ÍNDICE DE CONTENIDO	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
ÍNDICE DE FIGURAS.....	14
RESUMEN	17
ABSTRACT	18

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes	19
1.2. Planteamiento del Problema.....	20
1.3. Justificación e Importancia.....	21
1.4. Objetivos	22
1.4.1. Objetivo General.....	22
1.4.2. Objetivos Específicos.	22
1.5. Hipótesis.....	23
1.6. Variables de la Investigación.....	23

1.6.1. Variable Dependiente.	23
1.6.2. Variable Independiente.	23

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aceite de fusel	24
2.1.1. Composición.....	25
2.1.2. Usos y aplicaciones.....	26
2.2. Alcoholes amílicos	26
2.2.1. Usos de alcoholes amílicos.....	27
2.3. Cromatografía de gases	27
2.4. Diseño de procesos.....	28
2.4.1. Simulación de procesos.....	29
2.5. Software de simulación Pro/II Process Engineering	30
2.6. Destilación.....	30
2.6.1. Destilación simple.....	32
2.6.2. Destilación de equilibrio, simple cerrada, súbita o flash.	33
2.6.3. Destilación diferencial simple.	33
2.6.4. Destilación fraccionada o rectificación continua.....	34
2.6.5. Destilación azeotrópica.....	35
2.6.6. Destilación por oscilación de presión.	35
2.6.7. Destilación extractiva.....	35
2.6.8. Destilación reactiva.....	36
2.7. Tipos de columnas de destilación	36

	10
2.7.1. Columnas de bandejas o platos.....	36
2.7.2. Columnas empacadas o de empaques.....	38
2.8. Diseño de la columna de destilación.....	40
2.9. Análisis de riesgos y operabilidad (HAZOP).....	41
2.9.1. Descripción general del método HAZOP.....	42

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Materiales y Equipos.....	44
3.1.1. Reactivos.....	44
3.1.2. Equipos.....	44
3.2. Obtención de la materia prima.....	45
3.3. Deshidratación del aceite de fusel.....	46
3.4. Propiedades físicas.....	47
3.4.1. Color ASTM.....	47
3.4.2. pH.....	47
3.4.3. Punto de ebullición.....	48
3.4.4. Densidad.....	49
3.4.5. Viscosidad.....	49
3.5. Volatilidad.....	50
3.6. Caracterización del aceite de fusel.....	51
3.6.1. Composición química de aceite de fusel crudo.....	52
3.6.2. Composición química de aceite de fusel refinado.....	52
3.7. Modelado termodinámico del equilibrio de fase.....	52

3.8.	Simulaciones de las configuraciones para la obtención de alcoholes isoamílicos	52
3.8.1.	Configuración Uno	56
3.8.2.	Configuración Dos	61
3.8.3.	Configuración Tres	66
3.9.	Comparación de las configuraciones	71
3.10.	Análisis de riesgo y operabilidad (HAZOP)	71

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1.	Propiedades físicas	72
4.1.1.	Color ASTM	72
4.1.2.	pH	72
4.1.3.	Punto de ebullición	73
4.1.4.	Densidad	73
4.1.5.	Viscosidad	74
4.2.	Composición química del aceite de fusel	74
4.2.1.	Composición de aceite de fusel crudo	74
4.2.2.	Composición de aceite de fusel refinado	75
4.3.	Simulaciones de las configuraciones para la obtención de alcoholes isoamílicos	77
4.3.1.	Configuración Uno	77
4.3.2.	Configuración Dos	80
4.3.3.	Configuración Tres	82
4.4.	Comparación de las configuraciones	84
4.5.	Análisis HAZOP	84

CAPÍTULO V**5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1. Conclusiones 87

5.2. Recomendaciones..... 89

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 90**ANEXOS 94**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Composición del aceite de fusel según fuentes consultadas</i>	25
Tabla 2. <i>Rotulación de muestras</i>	45
Tabla 3. <i>Lista de propiedades del equipo Flash</i>	55
Tabla 4. <i>Resultados de color ASTM</i>	72
Tabla 5. <i>Resultados de medición de pH</i>	73
Tabla 6. <i>Resultados de punto de ebullición</i>	73
Tabla 7. <i>Resultados de determinación de densidad</i>	74
Tabla 8. <i>Composición de aceite de fusel crudo</i>	75
Tabla 9. <i>Composición de aceite de fusel refinado de la muestra M2</i>	76
Tabla 10. <i>Propiedades de flujo – lista de balance de materia (configuración uno)</i>	79
Tabla 11. <i>Propiedades de flujo – lista de balance de materia (configuración dos)</i>	81
Tabla 12. <i>Propiedades de flujo – lista de balance de materia (configuración tres)</i>	83
Tabla 13. <i>Resumen de la comparación entre las configuraciones</i>	84
Tabla 14. <i>Análisis HAZOP</i>	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Esquema de un cromatógrafo de gases</i>	28
Figura 2. <i>Columna de destilación</i>	31
Figura 3. <i>Diagrama de destilación simple</i>	33
Figura 4. <i>Esquema de una columna de destilación fraccionada</i>	34
Figura 5. <i>Funcionamiento de una columna de platos</i>	37
Figura 6. <i>Esquema y ejemplo real de tipos de platos</i>	38
Figura 7. <i>Tipo de empaques comerciales</i>	39
Figura 8. <i>Procedimiento general de estudio HAZOP</i>	42
Figura 9. <i>Muestras de aceite de fusel, con su respectiva rotulación</i>	45
Figura 10. <i>Separación de fases aceite de fusel – solución salina saturada</i>	46
Figura 11. <i>Determinación de color con la norma demostrativa ASTM D 1500</i>	47
Figura 12. <i>Medición de pH</i>	48
Figura 13. <i>Determinación del punto de ebullición</i>	48
Figura 14. <i>Determinación de la densidad</i>	49
Figura 15. <i>Determinación de la viscosidad</i>	50
Figura 16. <i>Volatilidades de los compuestos químicos presentes en el aceite de fusel crudo</i>	51
Figura 17. <i>Algoritmo para establecer la presión de la columna</i>	53
Figura 18. <i>Esquema del equipo flash drum</i>	54
Figura 19. <i>Datos ingresados en la corriente de entrada S1</i>	55
Figura 20. <i>Esquema del equipo Shortcut</i>	56
Figura 21. <i>Resumen de cálculos del equipo shortcut</i>	57
Figura 22. <i>Diagrama de flujo de proceso de la configuración uno</i>	58

	15
Figura 23. <i>Datos de la corriente de ALIMENTACIÓN</i>	59
Figura 24. <i>Datos de la corriente de BENCENO</i>	59
Figura 25. <i>Definición de la presión del condensador y reboiler</i>	60
Figura 26. <i>Selección del método de convencional a químico</i>	60
Figura 27. <i>Especificaciones y variables de la columna</i>	61
Figura 28. <i>Diagrama de flujo de la segunda configuración</i>	62
Figura 29. <i>Datos de la corriente AGUA</i>	63
Figura 30. <i>Datos de la corriente ALIMENTACIÓN</i>	63
Figura 31. <i>Especificación de producto en el equipo flash drum</i>	64
Figura 32. <i>Definición de la presión del condensador y reboiler para la columna T1</i>	64
Figura 33. <i>Especificaciones y variables de la columna T1</i>	65
Figura 34. <i>Definición de la presión del condensador y reboiler para la columna T2</i>	65
Figura 35. <i>Especificaciones y variables de la columna T2</i>	66
Figura 36. <i>Diagrama de flujo del proceso de la tercera configuración</i>	67
Figura 37. <i>Datos de la corriente S1</i>	68
Figura 38. <i>Definición de la presión del condensador y reboiler para la columna T1</i>	68
Figura 39. <i>Especificaciones y variables de la columna T1</i>	69
Figura 40. <i>Definición de la presión del condensador y reboiler para la columna T2</i>	69
Figura 41. <i>Especificaciones y variables de la columna T2</i>	70
Figura 42. <i>Especificación de producto en el equipo flash drum</i>	70
Figura 43. <i>Cromatograma de la muestra M2</i>	76
Figura 44. <i>Esquema del flujo de masa de la configuración uno</i>	78
Figura 45. <i>Esquema de flujo de masa de la configuración dos</i>	80

Figura 46. *Esquema del flujo de masa de la configuración tres* 82

RESUMEN

El aceite de fusel es un subproducto en la producción de etanol anhidro. Actualmente la utilización de subproductos ha despertado interés para lograr procesos más eficientes y rentables. El aceite de fusel es una mezcla de alcoholes superiores como alcohol isoamílico, pentanol, alcohol isobutílico, y alcoholes inferiores como metanol, etanol y propanol. El alcohol isoamílico es el componente principal del aceite de fusel, se usa en la producción de ésteres orgánicos, solventes, medicamentos, agentes aromatizantes y plastificantes, su precio en el mercado es tres veces superior al etanol anhidro. En este estudio, se simuló tres configuraciones de destilación para la separación y recuperación de alcohol isoamílico de alta pureza utilizando el simulador PRO/II Process Engineering V10.2, considerando el aceite de fusel una mezcla de seis componentes ($C_2 - C_5$). Las muestras de aceite de fusel fueron donadas por industrias ecuatorianas productoras de etanol anhidro, y analizadas mediante la técnica analítica de cromatografía de gases con espectrómetro de masas (GC / MS). El mejor diseño con un costo total anual mínimo (TAC) resulta en una recuperación del 99% de alcohol isoamílico. Se estableció un análisis de riesgo y operabilidad (HAZOP) de esta configuración para conocer e identificar posibles riesgos, accidentes o problemas de operabilidad.

PALABRAS CLAVES

- **ACEITE DE FUSEL**
- **ALCOHOL ISOAMÍLICO**
- **SIMULACIÓN**

ABSTRACT

Fusel oil is a by-product in the production of anhydrous ethanol. Currently the use of by-products has sparked interest to achieve more efficient and profitable processes. Fusel oil is a mixture of higher alcohols such as isoamyl alcohol, pentanol, isobutyl alcohol, and lower alcohols such as methanol, ethanol and propanol. Isoamyl alcohol is the main component of fusel oil, it is used in the production of organic esters, solvents, medicines, flavoring and plasticizing agents, its market price is three times higher than anhydrous ethanol. In this study, three distillation configurations for the separation and recovery of high purity isoamyl alcohol were simulated using the PRO / II Process Engineering V10.2 simulator, considering fusel oil a mixture of six components (C2 - C5). The fusel oil samples were donated by Ecuadorian industries producing anhydrous ethanol, and analyzed using the analytical technique of gas chromatography with mass spectrometer (GC / MS). The best design with a minimum annual total cost (TAC) results in a 99% recovery of isoamyl alcohol. A risk and operability analysis (HAZOP) of this configuration was established to know and identify possible risks, accidents or operability problems.

KEY WORDS

- **FUSEL OIL**
- **ISOAMYL ALCOHOL**
- **SIMULATION**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El aceite de fusel es un residuo en la producción de etanol, actualmente se utiliza como combustible en las destilerías y representa una materia prima económica para la recuperación de alcoholes amílicos los cuales tienen alto valor agregado. En Ecuador existen tres grandes destiladoras de alcohol que son: SODERAL S.A., CODANA S.A. y PRODUCARGO S.A., que integran la Asociación de Productores de Alcohol del Ecuador (APALE), las cuales obtienen su materia prima de los Ingenios Azucareros: SAN CARLOS, VALDEZ y LA TRONCAL, respectivamente.

En la investigación de (Ferreira, Meirelles y Batista, 2013), se evaluó el proceso de destilación industrial del aceite de fusel para obtener alcohol isoamílico utilizando el simulador Aspen Plus. El aceite de fusel es un subproducto en la elaboración de bioetanol que consiste en una mezcla de nueve componentes, de alcoholes superiores considerados como productos naturales con alto valor comercial. Su principal componente es el alcohol isoamílico, siendo un alcohol altamente cotizado en el mercado (aproximadamente tres veces el precio del combustible de etanol), es utilizado en la producción de ésteres orgánicos para la elaboración de solventes industriales, agentes aromatizantes y plastificantes. Equivalente a este estudio, el trabajo de (Montoya, Córdoba, Trujillo, Gil y Rodríguez, 2011) también señala que las alternativas de uso de este subproducto generan una producción de etanol más rentable y menos contaminante.

El estudio de (Campoverde y Yunga, 2017), presenta el dimensionamiento de los equipos de una planta piloto para elaborar un bioaditivo para gasolinas, a partir del aceite de fusel como un subproducto no aprovechado de la destilación del alcohol etílico. El proceso consiste en la caracterización, purificación y separación del alcohol isoamílico procedente del aceite de fusel. Los resultados obtenidos mediante cálculos fueron comparados utilizando el simulador Aspen Plus.

1.2. Planteamiento del Problema

El presente trabajo busca comparar los resultados entre modelos de simulación mediante el uso del software PRO/II Process Engineering versión 10.2, para la recuperación de alcoholes amílicos a partir de aceite de fusel, considerado como subproducto o residuo de la rectificación de etanol con contenido de alcoholes superiores (C_2 a C_5).

Actualmente en el país existen tres grandes empresas que proveen etanol anhidro a PETROECUADOR, como son: SODERAL S.A., CODANA S.A. y PRODUCARGO S.A., con una producción diaria de 40 000, 30 000 y 50 000 litros de etanol, respectivamente (Martínez, 2018). Considerando la producción diaria de etanol en la empresa SODERAL S.A. de 40 000 litros diarios aproximadamente, en 320 días laborables, con 1.5% de la capacidad total de la planta, en un turno de 8 horas (6 horas de producción de materia prima y 2 horas de envasado y almacenamiento de producto final), y 22 días al mes es decir 1542 horas al año, se obtiene una producción de aceite de fusel de 125 litros por día (Campoverde y Yunga, 2017).

Por lo tanto, la presente investigación busca una solución viable al uso de este residuo, por lo que existen varias investigaciones (Rodríguez, López, Armar y Ley, 2017), encaminadas a la búsqueda de posibles tecnologías para su aprovechamiento; una de ellas, es el diseño de una etapa de purificación para obtener acetato de isoamilo que es un producto con mayor valor agregado.

1.3. Justificación e Importancia

En los últimos años la industria de los biocombustibles ha crecido rápidamente, por consiguiente, el uso de los subproductos ha despertado interés para lograr procesos más eficientes y rentables. El aceite de fusel es un subproducto en la producción de etanol y está compuesto principalmente por alcohol isoamílico, que es una materia prima importante y económica para la fabricación de productos de alto valor agregado dentro del mercado químico. En la presente investigación, se efectuará la simulación del proceso de recuperación de alcoholes isoamílicos de alta pureza mediante el uso del software PRO/II Process Engineering V10.2.

El alcohol isoamílico es ampliamente usado en la fabricación de productos valiosos como ésteres, solventes, aceites lubricantes, plastificantes, medicamentos, entre otros (Montoya et al., 2011) y su precio en el mercado es aproximadamente tres veces el precio del combustible de etanol (Ferreira et al., 2013). En nuestro país, el aceite de fusel se utiliza como combustible en las destilerías o simplemente se lo considera como residuo.

La recuperación de alcohol isoamílico involucra dos etapas: la primera consiste en separar los alcoholes y agua de los componentes pesados mediante destilación y la segunda implica la purificación del alcohol isoamílico (Montoya et al., 2011). El proceso de simulación comprende estas dos etapas como se presenta más adelante en la tercera configuración.

Actualmente, existe una amplia investigación sobre simulación para la recuperación de alcohol isoamílico a partir de aceite de fusel utilizando Aspen Plus, sin embargo, no se ha encontrado información con el programa PRO/II Process Engineering V10.2, tampoco existen trabajos en el Ecuador que simulen la obtención de algún derivado del alcohol isoamílico.

Esto representa un reto y compromiso por parte de la estudiante, para buscar la solución más viable.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General.

Diseñar y simular configuraciones de destilación del proceso de enriquecimiento de alcohol isoamílico utilizando el software PRO/II Process Engineering V10.2 a partir del residuo de aceite de fusel.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Determinar la composición química y propiedades físicas de las muestras de aceite de fusel obtenidos de industrias ecuatorianas.

- Conocer mediante simulación como influye el uso de un agente de arrastre en la destilación azeotrópica para la obtención de alcoholes amílicos.
- Determinar la recuperación de alcoholes amílicos por simulación empleando equipos de decantación, columnas de destilación y extracción.
- Emplear un proceso de simulación que involucra dos etapas correspondientes a destilación y purificación para el enriquecimiento de alcoholes amílicos.
- Comparar el rendimiento y costos entre las configuraciones propuestas, y seleccionar el arreglo de separación más eficiente y económico.
- Analizar los riesgos y operabilidad del proceso de destilación propuesto, mediante el estudio HAZOP.

1.5. Hipótesis

¿Será posible obtener una recuperación mayor al 80% de alcoholes amílicos en las configuraciones de simulación planteadas?

1.6. Variables de la Investigación

1.6.1. Variable Dependiente.

Porcentaje de recuperación de alcoholes amílicos.

1.6.2. Variable Independiente.

Composición de aceite de fusel.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Aceite de fusel

El término aceite de fusel, alcohol de fusel o fusel oil por su denotación en inglés, proviene de la palabra alemana, fousel, que significa mal espíritu (Webb y Ingraham, 1963). El aceite de fusel es un subproducto de la producción de bioetanol y se refiere a compuestos de alto peso molecular, pues es una mezcla de alcoholes superiores, contiene principalmente alcoholes $C_3 - C_5$, es decir, más de dos átomos de carbono tales como alcohol isoamílico, isobutanol, propanol, butanol y otros; obtenidos durante la destilación del etanol (Ferreira et al., 2013). El aceite de fusel está compuesto en mayor proporción por alcohol isoamílico y en menor proporción por etanol, agua y componentes pesados (Montoya et al., 2011).

Según (Sulaiman y Gasmelseed, 2010), el aceite de fusel es un líquido relativamente viscoso, de color rojizo oscuro y olor muy desagradable y (Mayer et al., 2014) lo define como un líquido de color verde oscuro y olor acre.

El fusel oil se obtiene en la destilación discontinua (para la producción de aguardientes destilados), en la corriente de cola de cabeza o destilado (corriente compuesta por las sustancias menos volátiles), con altas concentraciones de agua y etanol; mientras que en la destilación continua, la extracción se produce en la parte inferior de la columna de rectificación (Mayer et al., 2014).

2.1.1. Composición.

La composición del fusel oil depende de las condiciones del medio de fermentación (presencia de aminoácidos, compuestos nitrogenados asimilables, temperatura y aireación), concentración y tipo de inóculos utilizados, la materia prima utilizada para obtener el sustrato de fermentación (Mayer et al., 2015), y por lo tanto la destilería de la cual provenga. Según (Martínez, Gallardo, López y Morales, 2011) el aceite de fusel se forma cuando se produce la fermentación alcohólica a altas temperaturas, con pH bajos, y cuando la actividad de la levadura está limitada por el contenido de Nitrógeno.

La composición promedio del aceite de fusel proveniente de destilerías de Brasil, Cuba y Sudán se muestra en la tabla 1, mientras que en Ecuador se determinó, que el contenido de alcohol isoamílico en el aceite de fusel tratado (deshidratado) y sin tratar, fue de 89,5% y 28,8%, respectivamente (Rodríguez y Alvarez, 2018).

Tabla 1.

Composición del aceite de fusel según fuentes consultadas

Componentes	Fracción masa		
	Brasil	Cuba	Sudán
Alcohol Isoamílico	0.5570	0.805829	-
Acetaldehído	-	0.00036	-
Alcohol Activo Amílico	0.1207	-	0.6102
Acetato de etilo	-	0.000096	-
Isobutanol	0.0671	0.163656	-

Componentes	Fracción masa		
	Brasil	Cuba	Sudán
Butanol	0.0057	-	0.0882
Pentanol	0.0003	-	-
Propanol	0.0094	0.001418	0.017
Etanol	0.0866	0.028194	0.2846
Metanol	0.0002	0.000447	-
Agua	0.1531	-	-

Nota. Recuperado de Ferreira et al., 2013, Martínez et al., 2011 y Sulaiman y Gasmelseed, 2010.

Reprinted with permission.

2.1.2. Usos y aplicaciones.

El aceite de fusel puede ser usado como un disolvente, un combustible para suministrar energía y como agente antiespumante (Sulaiman y Gasmelseed, 2010).

2.2. Alcoholes amílicos

Los alcoholes amílicos son un grupo de los alcoholes C_5 , que se obtienen por la hidroformilación de n-butenos seguida de la hidrogenación 1 – pentanol o n – pentanol, 2 – metil – 1 – butanol y 3 – metil – 1 – butanol o alcohol isoamílico, de fórmula general: $CH_3(CH_2)_3CCH_2OH$, $CH_3CH(CH_3CH_2)CH_2OH$ y $(CH_3)_2CHCH_2CH_2OH$, respectivamente. Son líquidos de olores agradables (Weissermel y Arpe, 1981).

2.2.1. Usos de alcoholes amílicos.

Los alcoholes presentes en el aceite de fusel tienen importantes usos, un ejemplo es el alcohol isoamílico que es ampliamente usado en la manufactura de productos como ésteres, solventes, aceites lubricantes, plastificantes, medicamentos, entre otros (Montoya et al., 2011).

La mezcla de alcoholes amílicos se utiliza como disolventes de grasas, aceites, varias resinas naturales y sintéticas en forma de ésteres como perfumes y extractos (Weissermel y Arpe, 1981).

2.3. Cromatografía de gases

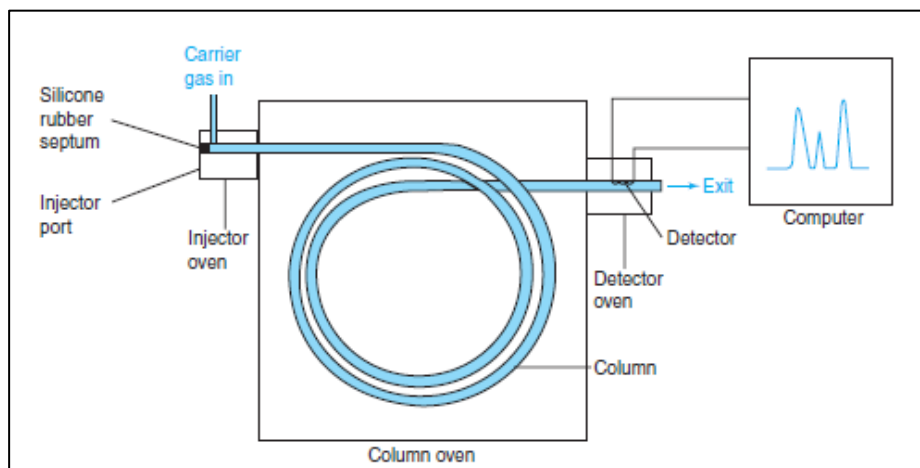
La cromatografía de gases es una técnica analítica de separación en la cual, la muestra se desplaza con una fase móvil (gas portador, como: Nitrógeno, Helio o Hidrógeno) a través de una fase estacionaria que es inmisible, y que se fija a una columna. Las dos fases se eligen de forma que los componentes se distribuyan de distinta manera entre la fase móvil y la fase estacionaria. Los componentes que son fuertemente retenidos por la fase estacionaria se mueven lentamente con el flujo de la fase móvil y por lo contrario los componentes que se unen débilmente a la fase estacionaria se mueven con rapidez. La distinta movilidad se refleja como bandas o zonas discretas que se analizan cualitativamente y/o cuantitativamente (Skoog, Holler y Nieman, 2001).

En la figura 1 se muestra un cromatógrafo de gases, donde una muestra gaseosa o líquida volátil se inyecta a través de un tabique (un disco de goma) en un puerto calentado, en el que se evapora rápidamente. El gas transportador arrastra el vapor a través de la columna, y los

analitos separados fluyen a través de un detector, cuya respuesta se muestra en una computadora. La columna debe estar lo suficientemente caliente como para proporcionar una presión de vapor suficiente para que los analitos se eluyan en un tiempo razonable. El detector se mantiene a una temperatura más alta que la columna, razón por la cual los analitos son gaseosos (Harris, 2010).

Figura 1.

Esquema de un cromatógrafo de gases



Nota. El gráfico representa un esquema del funcionamiento de un cromatógrafo de gases.

Tomado de Harris, 2010.

2.4. Diseño de procesos

Según (Martínez, Alonso, López, Salado y Rocha, 2000), el diseño de procesos dentro de la ingeniería es una estrategia, constituida por tres etapas: Síntesis de procesos, Simulación de procesos y Optimización.

La síntesis de procesos es la primera etapa, donde se crea la estructura básica del diagrama de flujo, seleccionan los equipos a utilizar con sus interconexiones respectivas y establece los valores iniciales de las condiciones de operación. La segunda etapa es la simulación de procesos donde se requiere solucionar balances de materia y energía para un proceso en estado estacionario (no hay acumulación), calcular dimensiones y costos de los equipos y efectuar una evaluación económica preliminar del proceso. Y finalmente en la etapa de optimización se modifican las variables de operación (temperatura, presión, caudal, etc.) y/o variables estructurales (características funcionales de equipos: área, número de etapas, etc.) (Martínez et al., 2000).

2.4.1. Simulación de procesos.

Es una técnica que evalúa en forma rápida un proceso con base a una representación del mismo mediante modelos matemáticos, su solución se lleva a cabo en programas de computadora que resuelven las ecuaciones que describen al sistema (Scenna et al., 2015).

En el mercado, hay una gran variedad de simuladores de procesos versátiles, entre ellos: Aspen Plus, Pro II y Chemcad para procesos en estado estable o estacionario, Speedup para procesos dinámicos y Hysys para los dos tipos de simulación (Martínez et al., 2000).

La simulación de procesos en estado estacionario ha llegado a ser una herramienta de apoyo para el diseño de procesos químicos y además para la enseñanza en carreras de ingeniería de distintas especialidades. En la industria química es muy importante, ya que es una

herramienta informática que permite el manejo de procesos en el diseño, caracterización, optimización y monitorio del funcionamiento de procesos industriales (Scenna et al., 2015).

2.5 Software de simulación Pro/II Process Engineering

PRO/II Process Engineering (de SimSci, Reino Unido) es una herramienta de simulación profesional que ofrece una solución de simulación integral para el diseño de procesos en estado estable. Este simulador cuenta con una amplia variedad de modelos termodinámicos, realiza balances de masa y energía rigurosos para procesos de prácticamente todas las industrias y proporciona resultados robustos y precisos basados en métodos termodinámicos estándar de la industria y datos de propiedades físicas (AVEVA Group, 2019).

2.6. Destilación

La destilación es una de las técnicas industriales de separación más estables, confiables y de propósito general para la separación de mezclas líquidas o gaseosas; debido a esto una de las operaciones unitarias más empleadas en la industria química, petroquímica, alimentaria y de la perfumería. Razón por la cual, más del 90% de todos los procesos de separación se llevan a cabo en plantas de destilación (Asano, 2007).

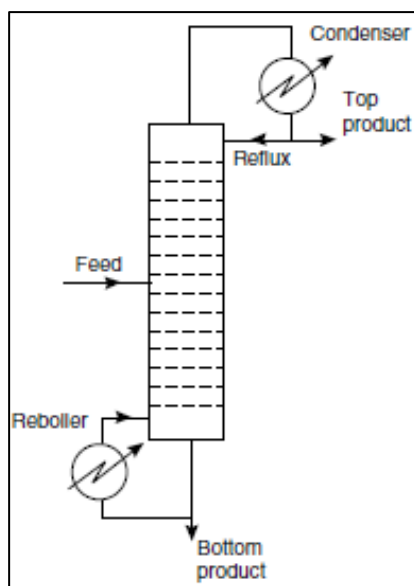
En la destilación, la separación de los constituyentes se basa en las diferencias de volatilidad y necesita de grandes cantidades de calor, pues, una fase vapor se pone en contacto con una fase líquida, transfiriéndose masa del líquido al vapor (por evaporación) y del vapor al líquido (por condensación) provocando un incremento en la concentración de los componentes

más volátiles en la fase vapor y de los menos volátiles en el líquido (Foust, Wenz, Clump, Maus y Andersen, 1961).

La alimentación de la columna de destilación ingresa en un punto situado en la parte media de la columna en un plato conocido como plato de alimentación, la parte de la columna situada arriba del plato de alimentación es la sección de enriquecimiento o concentración ya que el vapor se enriquece en componentes volátiles y la parte situada bajo el plato de alimentación es la sección de agotamiento o extracción donde ocurre el empobrecimiento del líquido en componentes volátiles, ver la figura 2, (Henley, Seader, Mato y Bartolomé, 2000).

Figura 2.

Columna de destilación



Nota. El gráfico representa las partes de una columna de destilación ordinaria. Tomado de Sinnott, Coulson y Richardson, 2005.

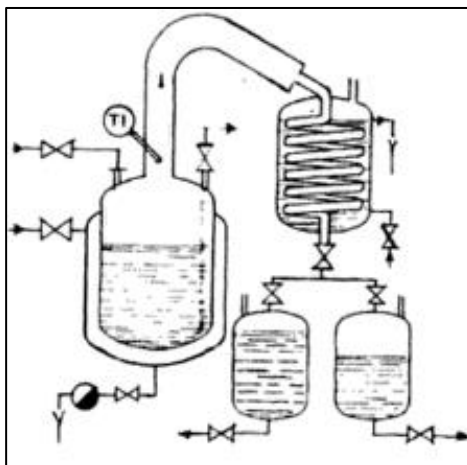
2.6.1. Destilación simple.

También conocida como destilación diferencial o de Rayleigh, es el tipo de destilación por lotes más elemental y su estructura consta de un alambique o recalentador, un condensador y un tanque receptor, además no tiene reflujo de material condensado. El proceso consiste en condensar el vapor en el condensador y recogerlo en el tanque receptor. Como el vapor es más rico en el componente más volátil en comparación con el líquido en el alambique, el líquido que queda en el alambique se volverá progresivamente más débil en el componente más volátil y, rico en el componente menos volátil, hasta que se agote el componente más volátil y se alcance una especificación del producto o el tiempo del lote ha llegado a su fin (Górak y Sorensen, 2014).

Se puede aplicar solo cuando los componentes tienen puntos de ebullición muy diferentes entre sí (mayor a 100 °C). Los aparatos utilizados en este tipo de destilación constan de un vaporizador, un condensador refrigerante y el recipiente colector del destilado, ver la figura 3 (Hopp, 2005).

Figura 3.

Diagrama de destilación simple



Nota. El gráfico representa el diagrama de destilación ordinaria o simple. Tomado de Hopp, 2005.

2.6.2. Destilación de equilibrio, simple cerrada, súbita o flash.

En esta destilación, el producto a destilar se calienta y luego se descarga en un recipiente a presión muy reducida donde se experimenta una expansión súbita, formándose dos fases: gaseosa y líquida, en equilibrio (Marcilla, Gómez, García y Cayuela, 1998).

La destilación de equilibrio se emplea frecuentemente para mezclas que se descomponen por el calor (Muñoz y Maroto, 2013).

2.6.3. Destilación diferencial simple.

Este tipo de destilación se realiza en régimen discontinuo o por lotes en una sola etapa, donde la alimentación se introduce en un recipiente calentado y se vaporiza, paulatinamente, el

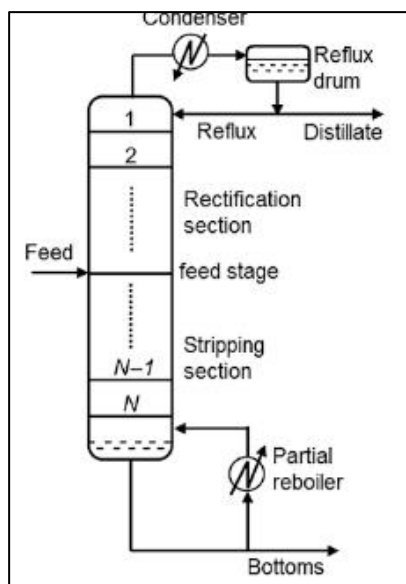
vapor circula por el aparato hasta llegar a una zona enfriada donde se condensa completamente y se recoge. Se emplea esta operación cuando se dispone de pequeñas cantidades de la mezcla y es útil a escala de laboratorio (Muñoz y Maroto, 2013).

2.6.4. Destilación fraccionada o rectificación continua.

Es un tipo de destilación a contracorriente de múltiples etapas y permite obtener un mayor rendimiento al lograr condensar el vapor y reciclando parte de este condensado como líquido. Los platos en la columna son enumerados desde arriba hacia abajo, pues en el tope se tendrá el plato 1 y en el fondo de la columna el plato N, como se observa en la figura 4.

Figura 4.

Esquema de una columna de destilación fraccionada



Nota. El gráfico representa el esquema de una columna de destilación fraccionada. Tomado de Sinnott et al., 2005.

En este proceso, el vapor del hervidor burbujea a través del líquido en la bandeja inferior en la sección de la columna (bandeja N) y se condensa parcialmente. El calor liberado condensando el vapor del hervidor al líquido en la bandeja inferior a su vez revaporizará parte del líquido en la bandeja, dando como resultado un vapor de una composición más alta. El vapor de la bandeja inferior se desplaza hacia arriba hasta la segunda bandeja más baja (bandeja 3) y se condensa parcialmente, lo que revaporizará parte de la bandeja de líquido. Este proceso de condensación parcial y revaporización se repite en cada bandeja a lo largo de la columna (Górak y Sorensen, 2014).

2.6.5. Destilación azeotrópica.

La destilación azeotrópica involucra componentes que forman azeótropos; por lo cual es necesario añadir un arrastrador o componente que incremente las volatilidades relativas de los componentes de la mezcla (Foust et al., 1961).

2.6.6. Destilación por oscilación de presión.

La destilación por oscilación de presión puede ser empleada en lugar de la destilación azeotrópica, cuando los puntos azeotrópicos son sensibles a cambios moderados en la presión que permiten la recuperación de dos componentes casi puros, separados únicamente por un límite de destilación (Seider, Seader, Lewin y Widagdo, 2009).

2.6.7. Destilación extractiva.

La destilación extractiva se utiliza en mezclas binarias con volatilidades relativas bajas o cercanas a 1, razón por la cual, sus componentes son difíciles de separar y se agrega un solvente

de volatilidad relativamente baja que forma una mezcla binaria con uno de los otros dos componentes (Muñoz y Grau, 2013).

2.6.8. Destilación reactiva.

La destilación reactiva es una combinación de separación y reacción en una columna para impulsar una (s) reacción (es) reversible hacia la finalización a través de la recuperación de sus productos en las corrientes de destilado y fondos. Este tipo de destilación permite aumentar el rendimiento general (Seider et al., 2009).

2.7. Tipos de columnas de destilación

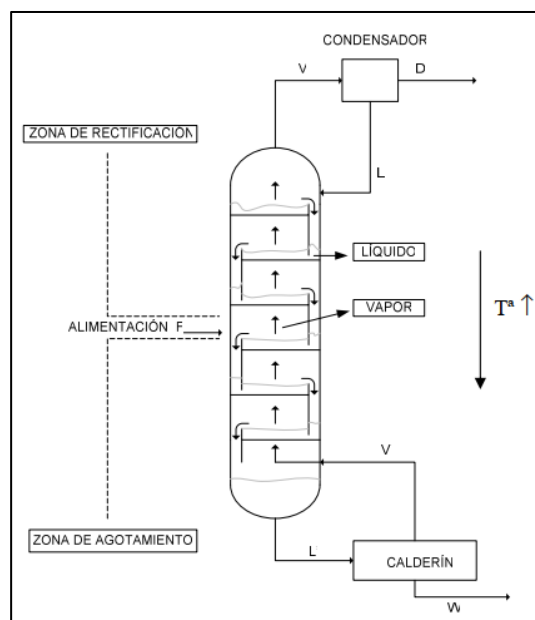
2.7.1. Columnas de bandejas o platos.

Las torres de bandejas consisten en una torre cilíndrica donde se coloca una serie de discos o platos, de forma que permiten el ascenso del vapor, en dichos platos se condensa la fase líquida, ocasionando la separación de sustancias, como se puede observar en la figura 5 (Asano, 2007).

Los tipos de platos más utilizados son tamiz o perforados, válvula y tapa de burbuja; como se muestran en la figura 6. El plato tipo tapa de burbuja es el más costoso y se especifica solo cuando se requiere una gran retención de líquidos en la bandeja. Las bandejas de tamices son las menos costosas y tienen la menor caída de presión por bandeja, pero tienen el rango de operación más estrecho (relación de reducción). Cuando se requiere flexibilidad puede optarse por las bandejas de válvulas (Seider et al., 2009).

Figura 5.

Funcionamiento de una columna de platos

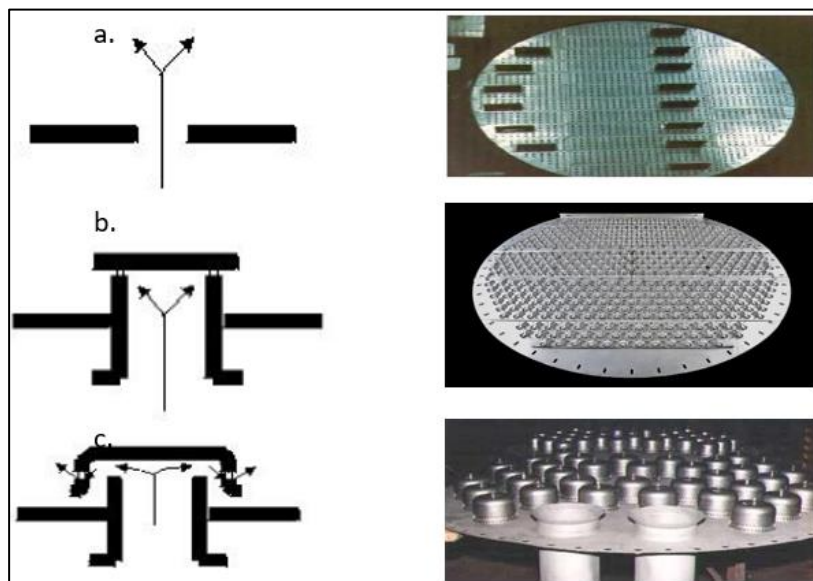


Nota. El gráfico representa el funcionamiento de una columna de platos. Tomado de Pérez, 2007.

Las columnas de platos se utilizan para tratar alimentaciones que contiene sólidos, altas proporciones de líquido a gas y procesos de separación industrial (plantas de gran capacidad), cuando el diámetro de la columna es mayor a 0.75 m y el número de etapas es mayor de 20 o 30 (Asano, 2007).

Figura 6.

Esquema y ejemplo real de tipos de platos: a. Platos perforados, b. Platos tipo válvula, c. Platos tipo tapa burbuja



Nota. El gráfico representa el esquema junto con un ejemplo real de platos. Tomado de Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.

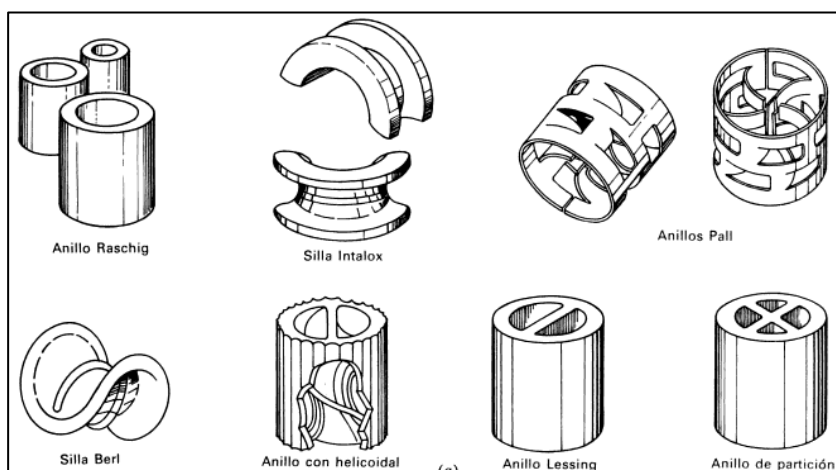
2.7.2. Columnas empacadas o de empaques.

Las columnas empacadas son cilindros verticales llenos de pequeños cuerpos sólidos de formas variables denominados empaques, los cuales proporcionan una superficie de contacto más amplia entre el vapor y líquido, aumentar la turbulencia y, por lo tanto, mejoran la eficiencia de la columna. Estas columnas se caracterizan porque su caída de presión es menor que la de una columna de platos con los mismos rendimientos de transferencia. Generalmente se emplean en columnas de diámetros menores de 0.3 m y mayores de 6 m (Duroudier, 2016).

Los empaques (figura 7) están disponibles en una variedad de materiales, generalmente: cerámica, metales y plásticos; y su elección dependerá de la naturaleza de los fluidos y de la temperatura de operación, aunque cabe señalar que empaques plásticos y metálicos son más eficientes que los cerámicos. Se recomienda utilizar empaques cerámicos para líquidos corrosivos; pero las cerámicas presentan inconvenientes al usarlas con álcalis fuertes. Los empaques plásticos (polipropileno) soportan temperaturas moderadas y son atacados por algunos solventes orgánicos. Y los empaques metálicos son usados en operaciones inestables (Sinnott et al., 2005).

Figura 7.

Tipo de empaques comerciales



Nota. El gráfico representa los tipos de empaque para columnas empacadas. Tomado de Fernández, 2016.

Los empaques se clasifican como aleatorios o estructurados. Los empaques aleatorios: anillos, monturas y formas patentadas, se utilizan en sistemas con bajo caudal de líquido, evitan la formación de espuma y brindan una caída de presión que oscila entre 3-4 mbar por etapa

teórica equivalente. Los empaques estructurados o de geometría regular como anillos apilados, rejillas y empaques estructurados patentados; muestran una baja pérdida de presión (1.5-2 mbar por etapa teórica equivalente), son utilizados en sistemas al vacío y presentan una alta eficiencia (Sinnott et al., 2005).

2.8. Diseño de la columna de destilación

Los principios generales de diseño se aplican tanto a sistemas binarios como multicomponentes. En los sistemas multicomponentes debido a la falta de datos correctos en el equilibrio vapor – líquido, presenta limitaciones en su aplicación dado que estos datos se necesitan para líquidos no ideales. Surgen dos problemas, el primero es tratar nuevos diseños sin conocer de manera certera los datos de equilibrio o sin estudios previos en una planta piloto, el segundo problema son los métodos inadecuados en el uso de la eficiencia de los platos. Por tanto, los cálculos de diseño implican métodos de ensayo y error prolongados, se emplea con mucha frecuencia el uso de un software de simulación. En casos extraordinarios los cálculos pueden realizarse manualmente (Treybal, 1997).

De acuerdo a (Treybal, 1997) las especificaciones iniciales de diseño son:

- Especificación de la alimentación (flujo, composición, temperatura y presión)
- Presión de destilación
- Localización óptima del plato de alimentación
- Pérdidas de calor (pueden suponerse igual a cero).

Establecidas estas condiciones, le queda al diseñador seleccionar tres puntos adicionales que se presentan a continuación, todas las demás características se consideran fijas (Treybal, 1997).

- Número total de platos
- Relación de reflujo.
- Relación del rehervidor (relación entre el vapor producido por el rehervidor y el residuo separado)
- Concentración de un componente en un producto
- Relación entre el flujo de un componente en el destilado y el flujo del mismo componente en el residuo
- Relación entre el destilado total y el residuo total.

2.9. Análisis de riesgos y operabilidad (HAZOP)

El análisis de riesgos y operabilidad, HAZOP por sus siglas en inglés "Hazard and Operability Study", es un método detallado para el examen del sistema y gestión de un proceso u operación definida. Se basa en una teoría que asume que los eventos de riesgo son causados por desviaciones del diseño o intenciones operativas. La identificación de tales desviaciones se facilita mediante el uso de conjuntos de "palabras guía" como una lista sistemática de perspectivas de desviación (PQRI, 2014).

De acuerdo con (Macdonald, 2004) los principales propósitos son:

- Identificar y evaluar los peligros dentro de un proceso u operación planificado.
- Identificar problemas operativos o de calidad significativos.

- Identificar problemas prácticos asociados con las operaciones de mantenimiento.

2.9.1. Descripción general del método HAZOP.

Los conceptos básicos de cada fase se presentan en la figura 8, como se ilustra a continuación:

Figura 8.

Procedimiento general de estudio HAZOP



Nota. El gráfico representa el procedimiento general de estudio HAZOP. Tomado de Macdonald, 2004.

- Fase de definición

La fase de definición comienza con la identificación preliminar de los miembros del equipo de evaluación de riesgos, este equipo debe determinar el alcance de la evaluación

cuidadosamente para enfocar el esfuerzo. Esto incluye definir los límites del estudio y las interfaces clave bajo los cuales se realizará la evaluación (PQRI, 2014).

- Fase de preparación

De acuerdo al estudio de (PQRI, 2014), esta fase generalmente incluye las siguientes actividades: identificar y localizar datos e información de soporte, identificación de la audiencia y usuarios de los resultados del estudio, preparación de la gestión de proyectos, consenso sobre el formato de plantilla para registrar los resultados del estudio y consenso sobre las palabras guía de HAZOP que se utilizarán durante el estudio.

- Fase de examen

Esta fase inicia con la identificación de todos los elementos (partes o pasos) del sistema o proceso a examinar, por ejemplo: los sistemas físicos pueden dividirse en partes más pequeñas según sea necesario. Las palabras de guía HAZOP se aplican a cada uno de los elementos. De esta manera, se realiza una búsqueda exhaustiva de las desviaciones de manera sistemática (PQRI, 2014).

- Documentación y fase de seguimiento

En esta última etapa la documentación se facilita mediante el uso de un formulario de registro de plantilla. Los equipos de evaluación de riesgos pueden modificar la plantilla según sea necesario en función de factores tales como: requisitos reglamentarios, necesidad de una clasificación o prioridad de riesgo más explícita, políticas de documentación de la compañía y la necesidad de trazabilidad o preparación para auditorías, entre otros factores (PQRI, 2014) .

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Materiales y Equipos

3.1.1. Reactivos

- Aceite de fusel
- Acetona grado analítico
- Ácido sulfúrico concentrado
- Alcohol isoamílico, pureza 98%.
- Alcohol isobutílico
- Gas Helio, pureza 99.9%.
- Sal industrial en grano.
- Pentanol, pureza 98%.

3.1.2. Equipos

- Cromatógrafo de gases, marca PerkinElmer Clarus 680.
- Espectrómetro de masas, marca PerkinElmer Clarus SQ 8 T.
- Ph de mesa BT – 675. Marca: BOECO, Modelo: BT – 675, Serie: JC00291.
- Densímetro portátil. Marca: METTLER TOLEDO, Modelo: 30PX, Serie: LWE75122.
- Viscosímetro Rotacional L1 de 3 a 2000000 mPas. Marca: BOECO, modelo: VRB 3000, Serie: VT – 1080.

3.2. Obtención de la materia prima

El aceite de fusel fue donado por las principales empresas productoras de etanol anhidro en el Ecuador: SODERAL S.A. y CODANA S.A. A continuación, en la tabla 2 se detalla la empresa con su correspondiente rotulación por cada muestra.

Tabla 2.

Rotulación de muestras

Empresa	Aceite de Fusel	Muestra
SODERAL S.A.	Fresco	M1
	Reposado	M2
CODANA S.A.	Fresco	M3

Figura 9.

Muestras de aceite de fusel, con su respectiva rotulación



3.3. Deshidratación del aceite de fusel

La extracción líquido – líquido se realiza entre el aceite de fusel y una solución salmuera saturada en agua al 27.7% w en 1000 mL. La relación aceite de fusel crudo y solución salina saturada es: $2/1$ y $1/1$, es decir para cada 100 mL de muestra se utiliza 50 y 100 mL de solución salmuera saturada, respectivamente. Se coloca en un embudo de decantación la muestra de aceite de fusel seguido de la solución salina saturada, se agita para homogenizar la mezcla, la separación de las fases se produce de manera instantánea, en un tiempo promedio de 1.5 minutos se puede constatar la separación completa. Por la parte inferior del decantador se extrae la salmuera con el agua desprendida, la disminución de contenido de agua incrementa el grado alcohólico presente en el aceite de fusel.

Figura 10.

Separación de fases aceite de fusel – solución salina saturada



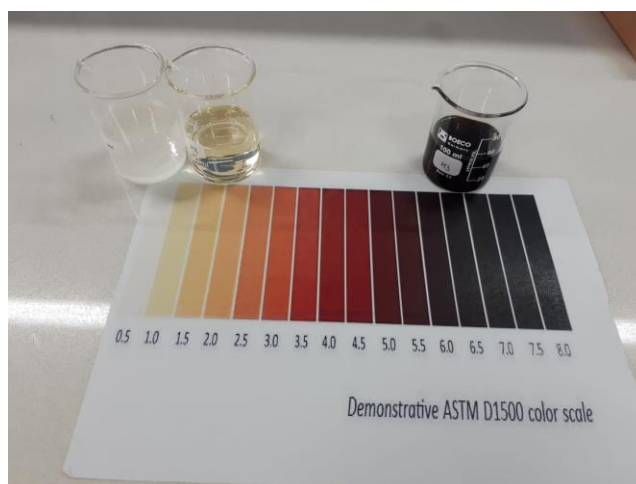
3.4. Propiedades físicas

3.4.1. Color ASTM.

El color de cada muestra se determinó de acuerdo a la escala de color demostrativa de la norma ASTM D1500, que describe un proceso visual para establecer en que rango de color (0.5 – 8) se encuentran las muestras de aceite de fusel, este rango va desde un color amarillo pálido hasta un color café oscuro.

Figura 11.

Determinación de color con la norma demostrativa ASTM D 1500

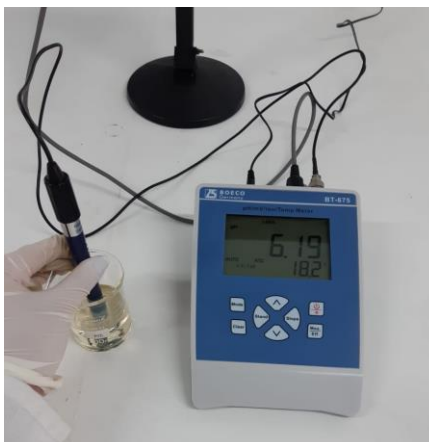


3.4.2. pH.

La medición de pH se realizó con el equipo pH de mesa BT – 675, primero se calibra el equipo con la ayuda de las soluciones buffer de 7 y 10. Las muestras se midieron por duplicado para reducir el error de ensayo, el tiempo de respuesta fue de 2 a 3 minutos, considerando el tiempo de estabilización (LOOK) que se muestra en la pantalla.

Figura 12.

Medición de pH



3.4.3. Punto de ebullición.

El punto de ebullición para cada una de las muestras se calculó con el uso de un termómetro industrial (-20 a 100 °C). Los tres ensayos se realizaron bajo las mismas condiciones de calentamiento en un tiempo estimado promedio de 30' a 1h por muestra.

Figura 13.

Determinación del punto de ebullición



3.4.4. Densidad

La densidad se determinó para las tres muestras de acuerdo a la norma INEN 349, efectuando el procedimiento por duplicado sobre cada muestra. También, para corroborar los resultados obtenidos, la densidad de cada una de las muestras se calculó con un densímetro portátil de manera más rápida y sencilla, el equipo tiene un tiempo de respuesta instantáneo de 1 a 2 minutos.

Figura 14.

Determinación de la densidad



Norma INEN 349



Densímetro portátil

3.4.5. Viscosidad

La viscosidad se cuantificó mediante el uso de un viscosímetro rotacional L1 de 3 a 2000000 mPas, conforme a la capacidad que tienen los fluidos al fluir se selecciona el aspa, respecto a esta definición las muestras fueron medidas con el aspa número 1, es decir no presentan mayor resistencia al fluir, el tiempo de respuesta fue de 3 a 5 minutos, suficiente para disminuir el error de medición y estabilizar la respuesta.

Figura 15.

Determinación de la viscosidad

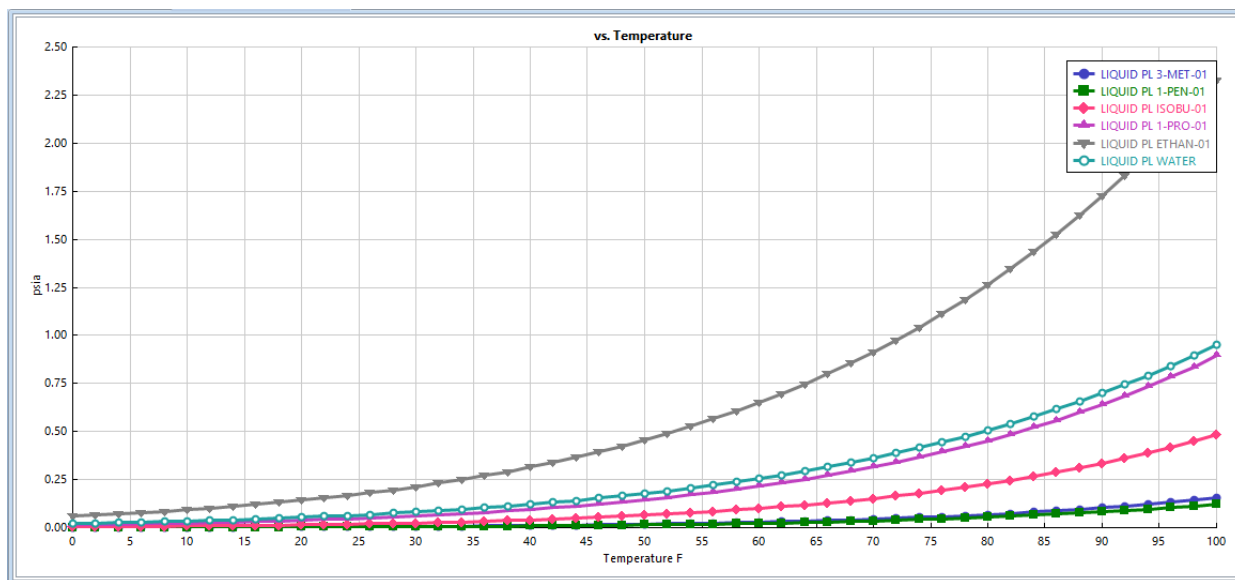


3.5. Volatilidad

La volatilidad ordena en forma ascendente los componentes presentes en el aceite de fusel crudo (es decir, desde la sustancia más volátil a la menos volátil). Esto nos permite determinar la tendencia que tienen las sustancias al pasar a la fase vapor, en la figura 16 se presenta que a una presión determinada (14.7 psia), las sustancias con mayor presión de vapor (C_2 , H_2O , C_3 y C_4) se evaporan más fácilmente con respecto a las sustancias con menor presión de vapor (C_5 compuesto de interés).

Figura 16.

Volatilidades de los compuestos químicos presentes en el aceite de fusel crudo



Nota. El gráfico representa las volatilidades de los compuestos químicos ordenados en forma ascendente presentes en el aceite de fusel crudo elaboradas por un software comercial.

3.6. Caracterización del aceite de fusel

El contenido de alcoholes presentes en el aceite de fusel se determina en forma cualitativa y cuantitativa mediante la técnica analítica GC – MS. Este análisis se realizó en un cromatógrafo de gases PerkinElmer Clarus 680 con un sistema de inyección automática, acoplado a un espectrómetro de masas PerkinElmer Clarus SQ 8 T. Las muestras se preparan diluyendo 1 μL de aceite de fusel en 1000 μL de acetona en viales de 1.5 mL, posteriormente se coloca los viales en el equipo y se ingresa las condiciones y método correcto en el software GC – MS TurboMass.

3.6.1. Composición química de aceite de fusel crudo

En estudios posteriores, el aceite de fusel crudo se analizará mediante la norma mexicana NMX-V-014-1986. Esta norma dispone de dos métodos para la determinación de alcoholes superiores (aceite de fusel) en bebidas alcohólicas destiladas que son: método químico y método cromatográfico (DGN, 1998).

3.6.2. Composición química de aceite de fusel refinado

El aceite de fusel refinado, es decir, que recibió un tratamiento de deshidratación previo al análisis cromatográfico como se describe en la sección 3.3, se analizó cualitativamente mediante el método cromatográfico descrito en la sección 3.6.

3.7. Modelado termodinámico del equilibrio de fase

El diseño exacto y correcta optimización de los procesos de destilación de aceite de fusel, requiere un conocimiento confiable del comportamiento de equilibrio de fase. Para la simulación se emplea el modelo termodinámico NRTL, que es sugerido por literatura y se comprueba con el uso del software. En el anexo 2 y 3 se presenta que este modelo termodinámico es ideal para la correcta separación de los alcoholes.

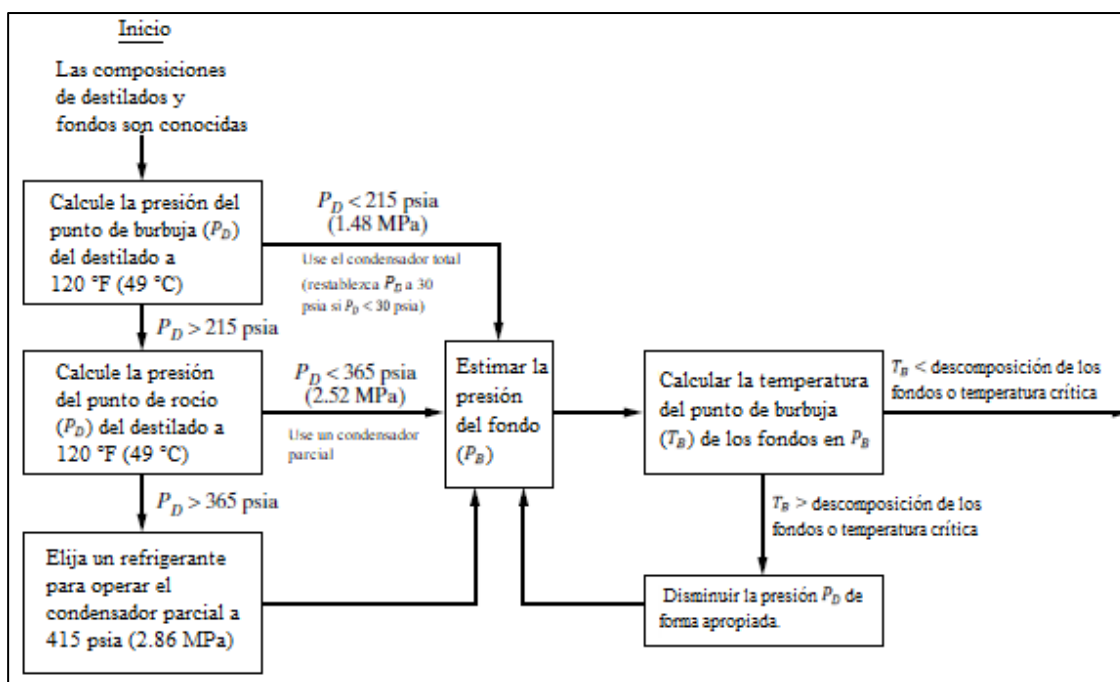
3.8. Simulaciones de las configuraciones para la obtención de alcoholes isoamílicos

Las simulaciones se realizaron con el uso del simulador PRO/II Process Engineering V10.2. En las columnas de destilación la numeración de las etapas comienza en la parte superior de la columna, donde el condensador está representado por la primera etapa y el hervidor como la última etapa. El algoritmo interno en PRO / II es un método basado en Newton para resolver

problemas de destilación no ideales (Cho y Jeon, 2006). Todas las columnas de destilación se simularon con la composición de aceite de fusel crudo que se presenta en la tabla 8, para procesar 100 kilogramos por hora de aceite de fusel (estimado de producción por planta), una recuperación del 90% de alcohol isoamílico y una eficiencia de Murphree igual a 0.7. Las condiciones preliminares de las presiones de operación de la columna y los tipos de condensador (total o parcial), son proporcionadas por el uso del algoritmo que se presenta en la figura 17 (Seider et al., 2009).

Figura 17.

Algoritmo para establecer la presión de la columna de destilación y el tipo de condensado

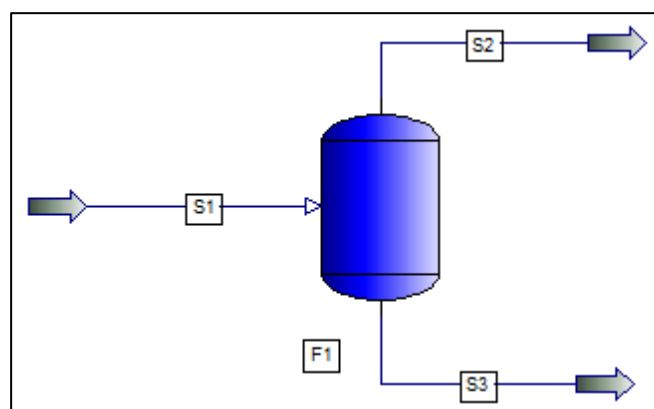


Nota. El gráfico representa el algoritmo que establece la presión de la columna de destilación y el tipo de condensador. Tomado de Seider et al., 2009.

La presión preliminar de operación para la composición de aceite de fusel crudo, se determinó mediante el uso del equipo flash drum, que se ilustra en la figura 18. De acuerdo a su temperatura de refrigeración (120 °F), se calculó la presión del punto de burbuja (PD = 1.93 psia) como se observa en la tabla 3. Este dato se ingresa en el algoritmo de la figura 17, que nos indica el uso de un condensador total y una presión de operación de 30 psia, para la presión de fondo sumamos 10 psia a la presión del condensador seleccionado. La presión de alimentación se calculó como líquido de punto de burbuja, es decir $P_{top} + 35 \text{ kPa}$.

Figura 18.

Esquema del equipo flash drum



Nota. El gráfico representa el esquema del equipo flash drum de la simulación en Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 19.

Datos ingresados en la corriente de entrada S1

Nota. El gráfico representa los datos ingresados, temperatura de 120 °F y punto de burbuja en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Tabla 3.

Lista de propiedades del equipo Flash

Nombre Flash		F1
Descripción Flash		
Temperatura	F	120.0000
Presión	PSIA	1.9266
DP	PSI	0.0000
Duty	MM BTU/HR	-0.0000

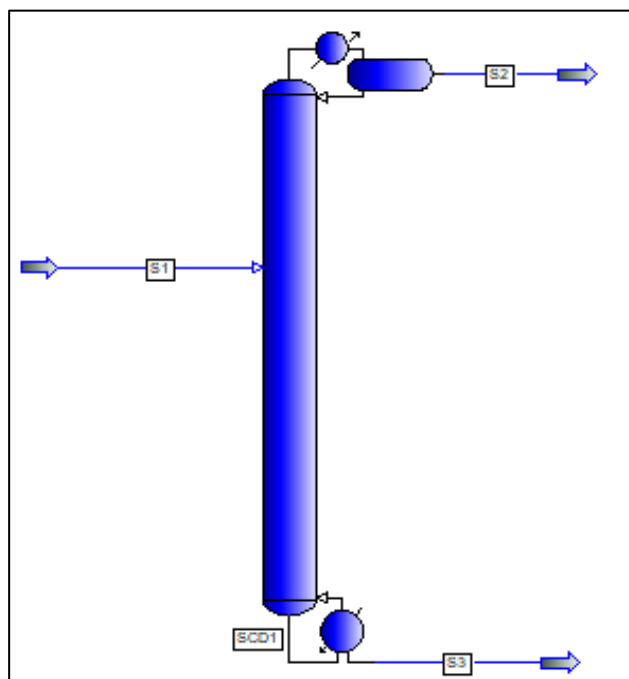
Nota. Esta tabla muestra las propiedades del equipo Flash drum.

3.8.1. Configuración Uno.

Esta configuración utiliza destilación azeotrópica heterogénea con benceno como agente de arrastre. Para determinar la relación de reflujo, el número de etapas teóricas mínimas y el plato óptimo de alimentación se emplea el equipo shortcut propio del software (Fig. 20). Es necesario definir algunos parámetros, como el tipo de condensador, factor multiplicador del reflujo mínimo, componente clave liviano y pesado, dos especificaciones de pureza y flujos estimados de los productos con sus respectivas presiones de salida o caídas de presión (AVEVA Group, 2019). El Resumen de cálculos del equipo se presenta en la figura 21.

Figura 20.

Esquema del equipo Shortcut



Nota. El gráfico representa el esquema del equipo shortcut de la simulación en Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 21.

Resumen de cálculos del equipo shortcut

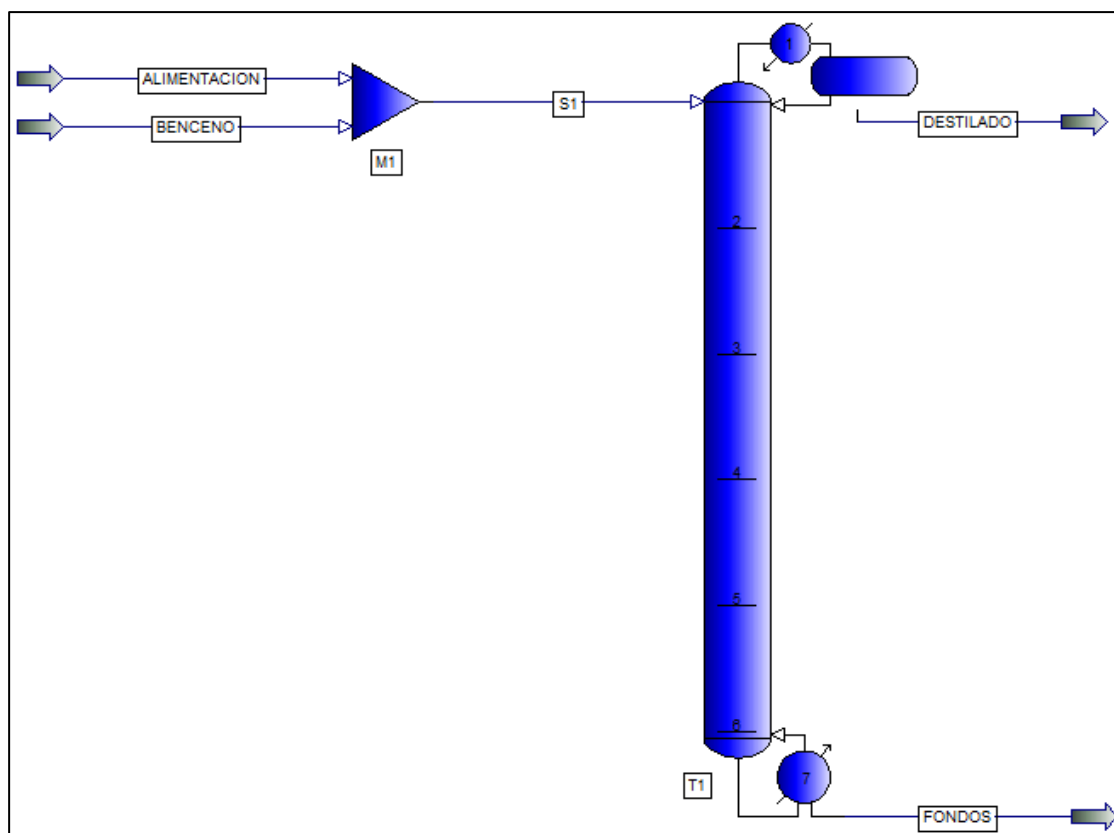
SUMMARY OF UNDERWOOD CALCULATIONS	
MINIMUM REFLUX RATIO	0.73010
FEED CONDITION Q	1.00000
FENSKE MINIMUM TRAYS	7.01207
OPERATING REFLUX RATIO	2.00 * R-MINIMUM

Nota. El gráfico representa el resumen de cálculos del equipo shortcut de la simulación en Pro/II Process Engineering V10.2.

Como se mencionó, los datos obtenidos en el equipo shortcut se utilizan para la simulación de una columna de destilación azeotrópica heterogénea, que se ilustra en la figura 22. Los componentes del aceite de fusel forman un azeótropo heterogéneo ternario agua + etanol + alcohol isoamílico (Ferreira et al., 2013). El agente de arrastre benceno induce la división en fase líquida y permite cruzar el límite de destilación de las especies a separar (Seider et al., 2009).

Figura 22.

Diagrama de flujo de proceso de la configuración uno



Nota. El gráfico representa el diagrama de flujo de proceso de la configuración uno en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 23.

Datos de la corriente de ALIMENTACIÓN

The screenshot shows the 'Stream Data' dialog box for a stream named 'ALIMENTACION'. The 'Stream' field is highlighted in green and contains the text 'ALIMENTACION'. The 'To Unit' is set to 'M1'. Under 'Stream Type', 'Composition Defined' is selected, and the 'Flowrate and Composition...' button is highlighted. The 'Thermal Condition' section shows 'First Specification' as 'Pressure' with a value of '35.08' psia, and 'Second Specification' as 'Bubble Point'. The 'Thermodynamic System' is set to 'Determined From Connectivity'. At the bottom, there are 'OK' and 'Cancel' buttons, and a note: 'Push to bring up the flowrate and composition window'.

Nota. El gráfico representa los datos ingresados en la corriente de ALIMENTACIÓN en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 24.

Datos de la corriente de BENCENO

The screenshot shows the 'Stream Data' dialog box for a stream named 'BENCENO'. The 'Stream' field is highlighted in green and contains the text 'BENCENO'. The 'To Unit' is set to 'M1'. Under 'Stream Type', 'Composition Defined' is selected, and the 'Flowrate and Composition...' button is highlighted. The 'Thermal Condition' section shows 'First Specification' as 'Pressure' with a value of '35.08' psia, and 'Second Specification' as 'Bubble Point'. The 'Thermodynamic System' is set to 'Determined From Connectivity'. At the bottom, there are 'OK' and 'Cancel' buttons, and a note: 'Push to bring up the flowrate and composition window'.

Nota. El gráfico representa los datos ingresados en la corriente BENCENO en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 25.

Definición de la presión del condensador y reboiler

Column - Pressure Profile

UOM Define Range Help Overview

Pressure Specification Mode

Overall

By Individual Trays

Overall Specification

Top Tray Pressure: psia

Pressure Drop

Per Tray: 0.00000 psi

Column: 0.00000 psi

Individual Tray Specification

Cut	Tray	Pressure psia
Copy		
Paste	1	30.000
Insert	2	40.000
Reset	3	
	4	
	5	

OK Cancel

Exit the window after saving all data

Nota. El gráfico representa la definición de la presión del condensador y reboiler ingresados en la columna de destilación en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 26.

Selección del método de convencional a químico

Column - Initial Estimates

UOM Range Help Overview

Initial Estimate Generation

Method:

Number of Iterations:

RATEFRAC Options...

Temperature Estimates

Condenser: F

Top Tray: F

Bottom Tray: F

Reboiler: F

Reflux Estimate

Use product rates calculated at the last iteration

Initial Profiles

Net Vapor Rate...

Vapor Composition...

Tray Temperature...

Liquid Composition...

Net Liquid Rate...

Mass Transfer...

Delete All Estimates

OK to PFD OK Cancel Cancel to PFD

Exit the window after saving all data

Nota. El gráfico representa el cambio de convencional a química, para la simulación de una columna de destilación azeotrópica en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 27.

Especificaciones y variables de la columna

Column - Specifications and Variables

UOM Range Help Overview

Add Specifications and Variables

Specifications:

	Specifications:	Active:
1	COLISPEC1 - Column T1 Reflux Ratio on a Mole basis = 1.4602 within the default tolerance	<input checked="" type="checkbox"/>
2	COLISPEC2 - Stream FONDQS Composition of component 3M1BUALC on a Wet basis in Mole percent = 99.000 within the default tolerance	<input checked="" type="checkbox"/>

Variables:

1	Column T1 Duty of Heater CONDENSER
2	Column T1 Duty of Heater REBOILER

The number of active specifications, 2 equals the number of Variables, 2

Data changes in this window will reinitialize column estimates

Insert Specification/Variable Insert Inactive Specification OK

Cut Specifications/Variables Reset Specifications/Variables Cancel

Exit the window after saving all data

Nota. El gráfico representa las especificaciones y variables ingresadas en la columna del simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

3.8.2. Configuración Dos.

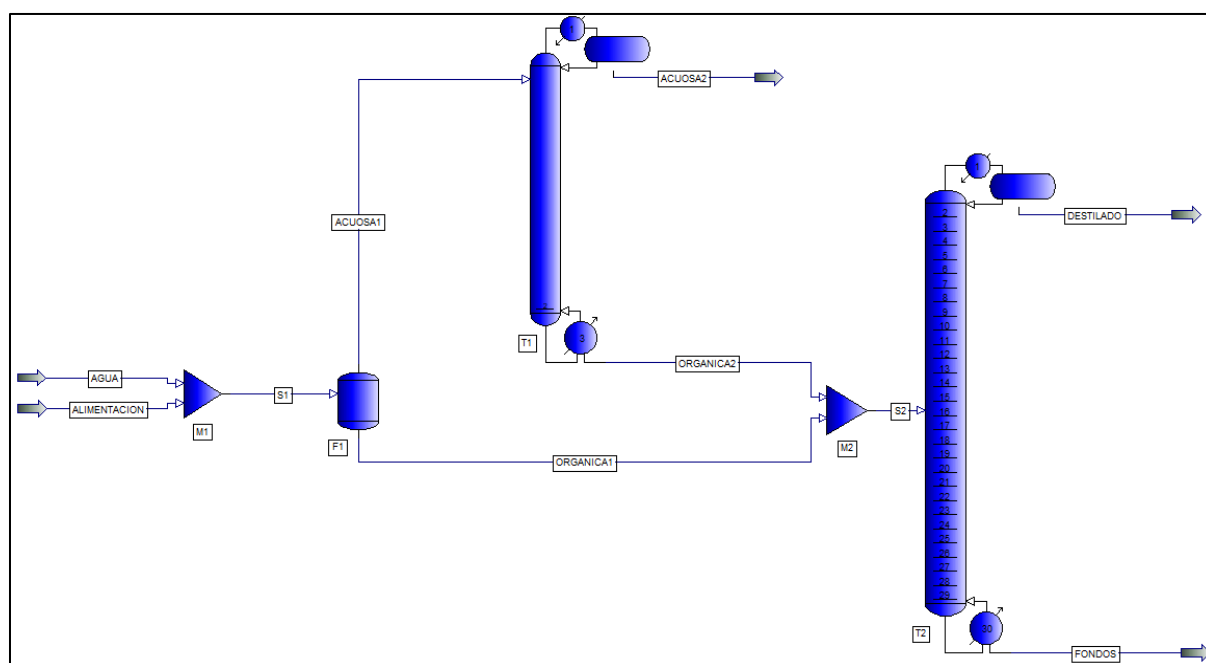
La configuración 2 se presenta en la figura 28. La simulación incluye procesos de decantación, extracción y destilación. El decantador permite cruzar el límite formado por el azeótropo heterogéneo ternario (agua + etanol + alcohol isoamílico) y reducir el contenido de agua (Ferreira et al., 2013).

La corriente de alimentación (S1) ingresa al decantador que genera a su vez dos corrientes de salida. La corriente orgánica 1 se alimenta a una columna de destilación (T2) y la corriente acuosa 1 se alimenta a la columna de extracción (T1) para recuperar los alcoholes presentes en esta fase. La columna de extracción recupera mayor porcentaje de alcohol

isoamílico en la corriente orgánica 2, que es realimentada a la columna de destilación, logrando una recuperación superior de alcohol isoamílico por los fondos.

Figura 28.

Diagrama de flujo de la segunda configuración



Nota. El gráfico representa el diagrama de flujo de proceso de la configuración dos en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 29.

Datos de la corriente AGUA

The screenshot shows the 'Stream Data' dialog box for a stream named 'AGUA'. The 'Stream' field contains 'AGUA' and the 'Description' field is empty. The 'To Unit' is set to 'M1'. Under 'Stream Type', 'Composition Defined' is selected, and the 'Flowrate and Composition...' button is highlighted. Other options include 'Petroleum Assay', 'Spiral Assay', 'Referenced to Stream', and 'Solids Only Stream'. The 'Thermal Condition' section shows 'First Specification' as 'Pressure' with a value of '35.08' psia, and 'Second Specification' as 'Bubble Point'. The 'Thermodynamic System' is set to 'Determined From Connectivity'. At the bottom, there are 'OK' and 'Cancel' buttons, and a note: 'Push to bring up the flowrate and composition window'.

Nota. El gráfico representa los datos ingresados en la corriente AGUA en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 30.

Datos de la corriente ALIMENTACIÓN

The screenshot shows the 'Stream Data' dialog box for a stream named 'ALIMENTACION'. The 'Stream' field contains 'ALIMENTACION' and the 'Description' field is empty. The 'To Unit' is set to 'M1'. Under 'Stream Type', 'Composition Defined' is selected, and the 'Flowrate and Composition...' button is highlighted. Other options include 'Petroleum Assay', 'Spiral Assay', 'Referenced to Stream', and 'Solids Only Stream'. The 'Thermal Condition' section shows 'First Specification' as 'Pressure' with a value of '35.08' psia, and 'Second Specification' as 'Bubble Point'. The 'Thermodynamic System' is set to 'Determined From Connectivity'. At the bottom, there are 'OK' and 'Cancel' buttons, and a note: 'Push to bring up the flowrate and composition window'.

Nota. El gráfico representa los datos ingresados en la corriente ALIMENTACIÓN en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 31.

Especificación de producto en el equipo flash drum

PRO/II - Flash Drum

UOM Define Range Help Overview Status Notes

Unit: F1 Description:

First Specification: Pressure Drop 0.00000 psi Thermodynamic System: Default (NRTL01)

Second Specification: Unit Specification: Product Specification: Stream ORGANICA1 Composition of component 3M1BUALC on a Dry basis in Mole percent = 75.000 within the default tolerance

Temperature Estimate: F Pressure Estimate: psia Pseudostream Flowrate: 0.00000 lb-mol/hr

Product Phases... Print Options... Entrainment...

OK Cancel

Exit the window after saving all data

Nota. El gráfico representa la especificación de producto del equipo flash drum en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 32.

Definición de la presión del condensador y reboiler para la columna T1

Column - Pressure Profile

UOM Define Range Help Overview

Pressure Specification Mode: Overall By Individual Trays

Overall Specification: Top Tray Pressure: psia Pressure Drop: Per Tray: 0.00000 psi Column: 0.00000 psi

Individual Tray Specification:

Cut	Tray	Pressure psia
Copy		
Paste	1	30.000
Insert	2	40.000
Reset	3	

OK Cancel

Exit the window after saving all data

Nota. El gráfico representa la definición de la presión del condensador y reboiler ingresados en la columna T1 en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 33.

Especificaciones y variables de la columna T1

Column - Specifications and Variables

UOM Range Help Overview

Add Specifications and Variables

Specifications:

	Specifications:	Active:
1	COL1SPEC1 - Column T1 Reflux Ratio on a Mole basis = 1.0000 within the default tolerance	<input checked="" type="checkbox"/>
2	COL1SPEC2 - Stream ORGANICA2 Composition of component 3M1BUALC on a Dry basis in Mole percent = 80.000 within the default tolerance	<input checked="" type="checkbox"/>

Variables:

1	Column T1 Duty of Heater CONDENSER
2	Column T1 Duty of Heater REBOILER

The number of active specifications, 2 equals the number of Variables, 2

Data changes in this window will reinitialize column estimates

Insert Specification/Variable Insert Inactive Specification OK

Cut Specifications/Variables Reset Specifications/Variables Cancel

Exit the window after saving all data

Nota. El gráfico representa las especificaciones y variables ingresadas en la columna T1 del simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 34.

Definición de la presión del condensador y reboiler para la columna T2

Column - Pressure Profile

UOM Define Range Help Overview

Pressure Specification Mode

Overall

By Individual Trays

Overall Specification

Top Tray Pressure: psia

Pressure Drop

Per Tray: 0.00000 psi

Column: 0.00000 psi

Individual Tray Specification

	Tray	Pressure psia
Copy		
Paste	1	30.000
Insert	2	40.000
Reset	3	
	4	
	5	

OK Cancel

Exit the window after saving all data

Nota. El gráfico representa la definición de la presión del condensador y reboiler ingresados en la columna T2 en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 35.

Especificaciones y variables de la columna T2

Nota. El gráfico representa las especificaciones y variables ingresadas en la columna T2 del simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

3.8.3. Configuración Tres.

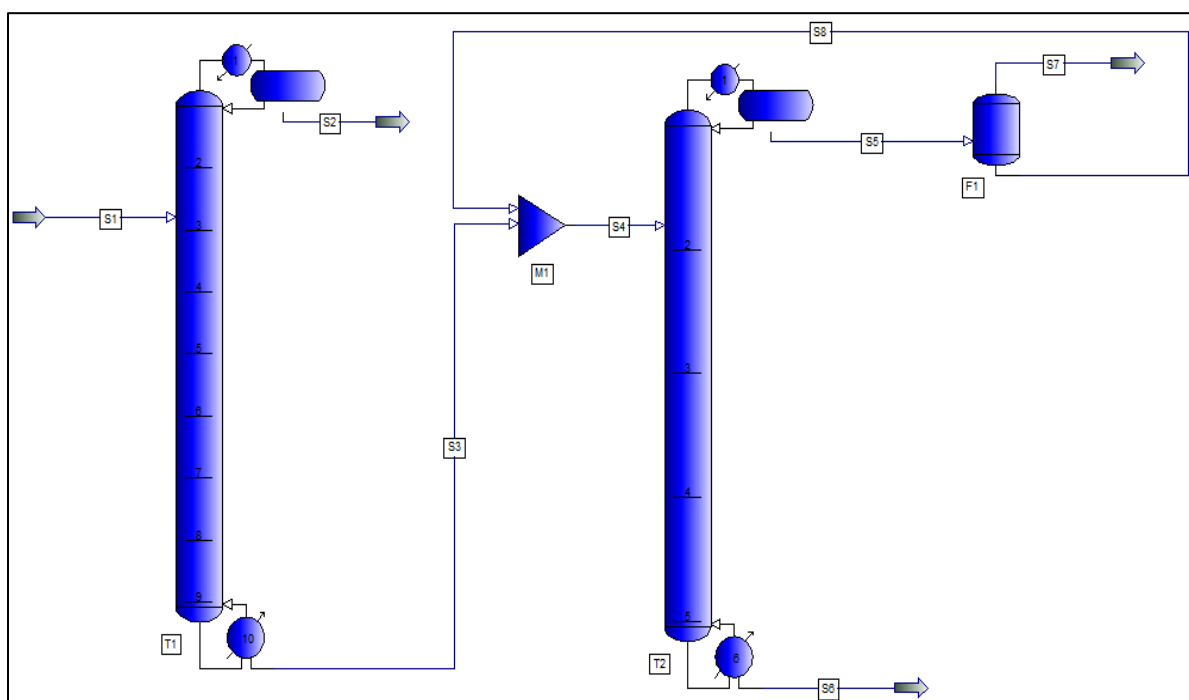
El proceso de simulación involucra dos etapas principales y se presenta en la figura 36. La primera utiliza la destilación para separar los alcoholes y el agua de los componentes pesados, y la segunda implica la purificación del alcohol isoamílico (Montoya et al., 2011).

En la primera etapa el aceite de fusel (S1) se alimenta a una columna de destilación (T1) para separar una mezcla de componentes más ligeros y recuperar los componentes pesados. En la segunda etapa, los componentes pesados (S3) se alimenta a una columna de purificación para extraer el etanol y agua por la parte superior y obtener alcohol isoamílico de alta pureza por la

parte inferior. La corriente (S5) arrastra una cantidad pequeña de alcohol isoamílico, por lo tanto, esta corriente ingresa a un decantador que divide la corriente en dos fases líquidas, una fase acuosa y una fase orgánica que se realimenta a la corriente S3, para tener una mayor tasa de recuperación y mayor recuperación de alcohol isoamílico.

Figura 36.

Diagrama de flujo del proceso de la tercera configuración



Nota. El gráfico representa el diagrama de flujo de proceso de la configuración tres en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 37.

Datos de la corriente S1

PRO/II - Stream Data

UOM Range Help Tag Overview Status Notes

Stream: S1 Description:

To Unit: T1

Stream Type

- Composition Defined
- Petroleum Assay
- Referenced to Stream
- Solids Only Stream

Buttons: Flowrate and Composition..., Stream Solids Data..., Stream Polymer Data...

Thermal Condition

First Specification: Pressure 35.080 psia

Second Specification: Bubble Point

Thermodynamic System: Determined From Connectivity

Buttons: OK, Cancel

Push to bring up the flowrate and assay window

Nota. El gráfico representa los datos ingresados en la corriente S1 en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 38.

Definición de la presión del condensador y reboiler para la columna T1

Column - Pressure Profile

UOM Define Range Help Overview

Pressure Specification Mode

Overall

By Individual Trays

Overall Specification

Top Tray Pressure: psia

Pressure Drop

Per Tray: 0.00000 psi

Column: 0.00000 psi

Individual Tray Specification

Cut	Tray	Pressure psia
Copy		
Paste	1	30.000
Insert	2	40.000
Reset	3	
	4	
	5	

Buttons: OK, Cancel

Exit the window after saving all data

Nota. El gráfico representa la definición de la presión del condensador y reboiler ingresados en la columna T1 en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 39.

Especificaciones y variables de la columna T1

Column - Specifications and Variables

UOM Range Help Overview

Add Specifications and Variables

Specifications:

	Specifications:	Active:
1	COL1SPEC1 - Column T1 Reflux Ratio on a Mole basis = 0.35000 within the default tolerance	<input checked="" type="checkbox"/>
2	COL1SPEC2 - Stream S3 Composition of component 3M18UALC on a Dry basis in Mole percent = 72.000 within the default tolerance	<input checked="" type="checkbox"/>

Variables:

1	Column T1 Duty of Heater CONDENSER
2	Column T1 Duty of Heater REBOILER

The number of active specifications, 2 equals the number of Variables, 2

Data changes in this window will reinitialize column estimates

Insert Specification/Variable Insert Inactive Specification OK

Cut Specifications/Variables Reset Specifications/Variables Cancel

Exit the window after saving all data

Nota. El gráfico representa las especificaciones y variables ingresadas en la columna T1 del simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 40.

Definición de la presión del condensador y reboiler para la columna T2

Column - Pressure Profile

UOM Define Range Help Overview

Pressure Specification Mode:

Overall

By Individual Trays

Overall Specification:

Top Tray Pressure: psia

Pressure Drop:

Per Tray: 0.00000 psi

Column: 0.00000 psi

Individual Tray Specification:

	Tray	Pressure psia
Copy		
Paste	1	30.000
Insert	2	40.000
Reset	3	
	4	
	5	

OK Cancel

Exit the window after saving all data

Nota. El gráfico representa la definición de la presión del condensador y reboiler ingresados en la columna T2 en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 41.

Especificaciones y variables de la columna T2

The screenshot shows the 'Column - Specifications and Variables' dialog box. It has a menu bar with 'UOM', 'Range', 'Help', and 'Overview'. A checkbox 'Add Specifications and Variables' is checked. Below, there are two sections: 'Specifications' and 'Variables'. The 'Specifications' section contains two entries, both with 'Active' checkboxes checked:

Index	Specification	Active
1	COL2SPEC2 - Column T2 Reflux Ratio on a Mole basis = 2.0000 within the default tolerance	<input checked="" type="checkbox"/>
2	COL2SPEC3 - Stream S6 Composition of component 3M1BUALC on a Dry basis in Mole percent = 99.000 within the default tolerance	<input checked="" type="checkbox"/>

The 'Variables' section contains two entries:

Index	Variable
1	Column T2 Duty of Heater CONDENSER
2	Column T2 Duty of Heater REBOILER

Below the variables, a message states: 'The number of active specifications, 2 equals the number of Variables, 2'. There is a checked checkbox 'Data changes in this window will reinitialize column estimates'. At the bottom, there are buttons for 'Insert Specification/Variable', 'Insert Inactive Specification', 'OK', 'Cut Specifications/Variables', 'Reset Specifications/Variables', and 'Cancel'. A footer note says 'Exit the window after saving all data'.

Nota. El gráfico representa las especificaciones y variables ingresadas en la columna T2 del simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

Figura 42.

Especificación de producto en el equipo flash drum

The screenshot shows the 'PRO/II - Flash Drum' dialog box. It has a menu bar with 'UOM', 'Define', 'Range', 'Help', 'Overview', 'Status', and 'Notes'. The 'Unit' is set to 'F1' and the 'Description' is empty. The 'First Specification' is 'Pressure Drop' with a value of '0.00000 psi' and 'Thermodynamic System' set to 'Default (NRTL01)'. The 'Second Specification' is 'Product Specification' (selected with a radio button), with a value of 'Stream S8 Composition of component 3M1BUALC on a Dry basis in Mole percent = 80.000 within the default tolerance'. There are input fields for 'Temperature Estimate' (F), 'Pressure Estimate' (psia), and 'Pseudostream Flowrate' (lb-mol/hr). Buttons for 'Product Phases...', 'Print Options...', and 'Entrainment...' are visible. At the bottom, there are 'OK' and 'Cancel' buttons. A footer note says 'Exit the window after saving all data'.

Nota. El gráfico representa la especificación de producto del equipo flash drum en el simulador Pro/II Process Engineering V10.2.

3.9. Comparación de las configuraciones

La comparación de las configuraciones, se fundamenta en el porcentaje de recuperación de alcoholes isoamílicos y costo anual total (TAC) en KWh. El TAC se obtuvo con ayuda del software; De acuerdo a la nueva tarifa eléctrica del 2018, en el sector industrial y artesanal el consumo de energía en el Ecuador es \$0.003 en KWh, en una jornada laboral de lunes a viernes de 08:00 – 18:00, sin considerar fines de semana. Los resultados se encuentran en la tabla 13.

3.10. Análisis de riesgo y operabilidad (HAZOP)

El análisis HAZOP se incluye en la investigación como una herramienta de evaluación de riesgo cualitativo e inductivo. Como se mencionó en la sección 2.9.1. este análisis consta de cuatro etapas que son: definición, preparación, examen y por último informes y seguimiento.

El sistema de estudio es el proceso de destilación azeotrópica heterogénea (configuración uno), la “parte” o “nodo” del sistema es la columna de destilación azeotrópica que se observa en la figura 22, en la tercera etapa se define al elemento como el contenido de la columna que permite establecer todas las posibles desviaciones, causas, consecuencias, necesidades y acciones de protección, por último, en la cuarta etapa se elabora la tabla de registro.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Propiedades físicas

4.1.1. Color ASTM

Los aceites de fusel presentan color variado, las muestra M1 y M2 se encuentra entre los valores de la carta de colores ASTM de 0.5 a 1.5 Por otra parte, el aceite de fusel M3 presentó una coloración con un valor de 6.5, puesto que presentaba una tonalidad más fuerte en comparación con las demás muestras.

Tabla 4.

Resultados de color ASTM

Código de muestra	Color ASTM
M1	0.5
M2	1.0
M3	6.5

4.1.2. pH

El pH determinado para las muestras se presenta en la tabla 5, estos datos nos permiten afirmar que en general las muestras de aceite de fusel tienen pH ácido.

Tabla 5.*Resultados de medición de pH*

Código de muestra	pH
M1	5.47
M2	6.05
M3	4.47

4.1.3. Punto de ebullición

A continuación, en la tabla 6, se presenta los resultados obtenidos del punto de ebullición, con una variación entre 85 y 115 °C, como se discutió en la sección 3.4.3. el tiempo de respuesta se encuentra entre 30´ a 1 hora por muestra.

Tabla 6.*Resultados de punto de ebullición*

Código de muestra	Temperatura (°C)
M1	85
M2	80
M3	115

4.1.4. Densidad

La densidad se analizó de acuerdo a la norma INEN 349, esta norma establece que cada ensayo se realiza por duplicado, los datos reportados en la tabla 7 son el promedio por cada muestra. La densidad en M1 es mayor con respecto a las demás muestras, considerando que esta muestra tiene mayor contenido de agua.

Tabla 7.*Resultados de determinación de densidad*

Código de muestra	Densidad (g/cm^3)
M1	0.96
M2	0.84
M3	0.85

4.1.5. Viscosidad

La viscosidad de las muestras analizadas es 9.0 cP determinadas con un rango de medición de 30 cP, margen de error de 30% y una temperatura promedio de 17.8 °C. La cuantificación de la viscosidad es la misma para las muestras, considerando que el equipo no es muy sensible para la medición de alcoholes.

4.2. Composición química del aceite de fusel**4.2.1. Composición de aceite de fusel crudo**

Los resultados de la composición del aceite de fusel crudo se basa en datos bibliográficos reportados en la tabla 1, considerando que no fue posible terminar la parte experimental y cuantificar el aceite de fusel crudo por la emergencia sanitaria del COVID – 19. En la tabla 8, se reporta la composición ideal de aceite de fusel crudo para la simulación.

Tabla 8.*Composición de aceite de fusel crudo*

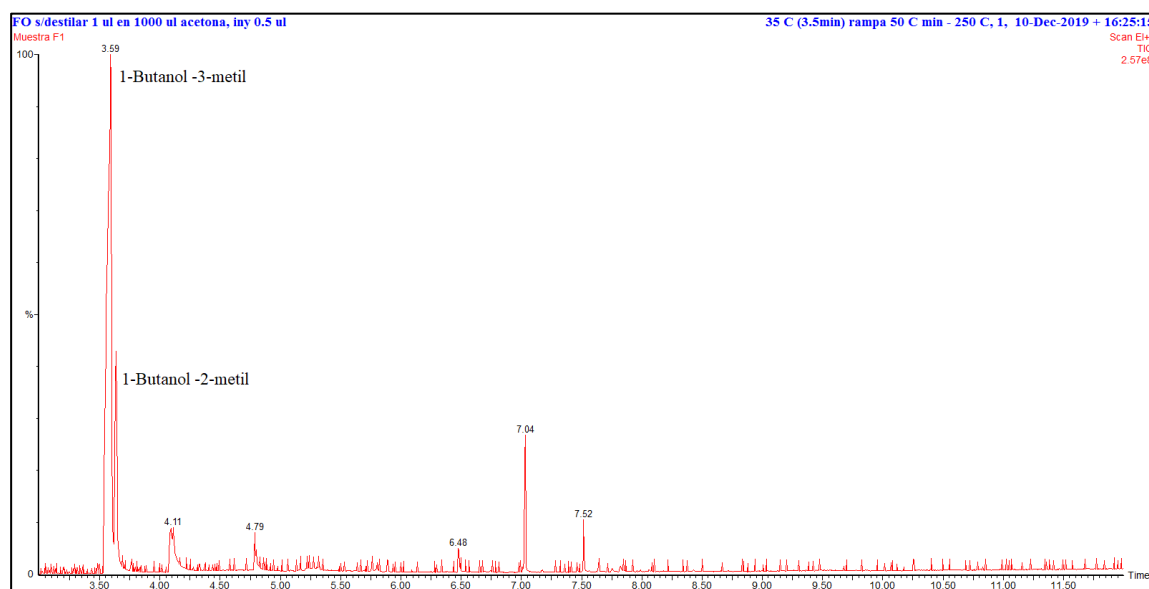
	Componentes	Porcentaje	Fracción masa
		Fracción masa	
A	Etanol	0.0866	8.66
B	Propanol	0.094	9.4
C	Isobutanol	0.0671	6.71
D	Agua	0.1531	15.31
E	Alcohol isoamílico	0.5987	59.87
F	Pentanol	0.0005	0.05
	Total	1	100

4.2.2. Composición de aceite de fusel refinado

Como se mencionó en el apartado 3.3, se describe la deshidratación del aceite de fusel. En la tabla 9 se presenta los resultados obtenidos en forma cualitativa de la muestra M2 por ser la muestra con mayor cantidad de alcohol isoamílico, y en la figura 43 su correspondiente cromatograma. De acuerdo a estos datos se establece que la deshidratación absorbe alcoholes inferiores ($C_2 - C_4$), y enriquece los alcoholes superiores C_5 . En el anexo 6 y 7 se adjunta el cromatograma de las muestras M1 y M3, respectivamente.

Tabla 9.*Composición de aceite de fusel refinado de la muestra M2*

	Componentes	Área %
A	Alcohol isoamilico	52.678
B	Alcohol isoamilico activo	8.745
C	Pentanol	5.166

Figura 43.*Cromatograma de la muestra M2*

Nota. El anexo representa el cromatograma del aceite de fusel deshidratado para la muestra M2 analizado en el cromatógrafo de gases PerkinElmer Clarus 680.

4.3. Simulaciones de las configuraciones para la obtención de alcoholes isoamílicos

4.3.1. Configuración Uno

El diseño de la columna de destilación azeotrópica utiliza los datos obtenidos en simulación del equipo shortcut (figura 21), que resulta en una torre de 7 platos, condición de alimentación en el primer plato y razón de reflujo de 1.46. La altura y diámetro de la columna se determinaron de acuerdo a la tabla 6.1 presentada en el anexo 4 del libro de (Treybal, 1997). A continuación, se presenta la ecuación (1) para calcular la altura:

$$h = N * distancia\ entre\ platos\ (1)$$

Siendo h la altura y N el número de platos. La altura calculada es de 1.05 m, con espaciamiento de 0.15 m por plato y un diámetro menor a 1 m. Estas condiciones permiten una recuperación de alcohol isoamílico del 99%, y establecer que el agente de arrastre empleado (benceno), incita la división en la fase líquida y cruza el límite de destilación formado entre el alcohol isoamílico, etanol y agua.

Figura 44.

Esquema del flujo de masa de la configuración uno

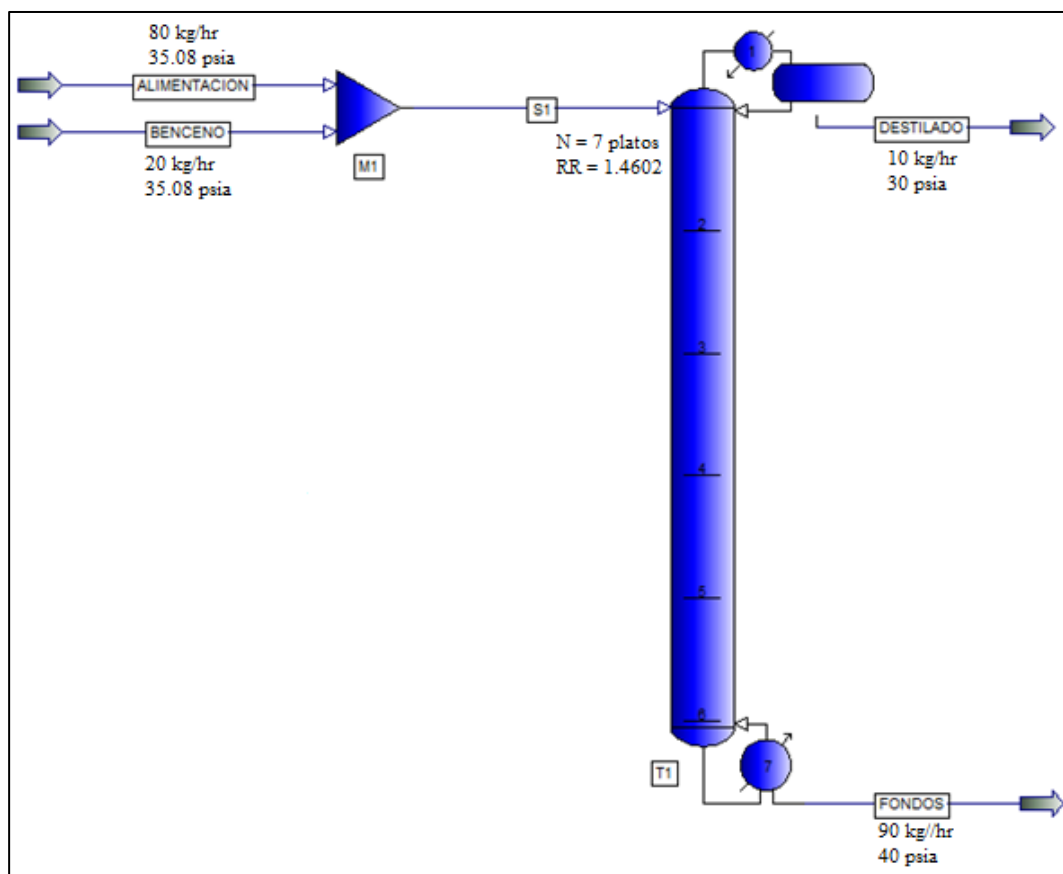


Tabla 10.*Propiedades de flujo – lista de balance de materia (configuración uno)*

Nombre de la corriente	Alimentación	Benceno	S1	Destilado	Fondos
Fase	Liquido	Liquido	Mezcla	Liquido	Liquido
Temperatura (F)	240.012	232.401	216.871	191.115	325.657
Presión (PSIA)	35.080	35.080	35.080	30.000	40.000
Flujo (LB-MOL/HR)	3.465	0.564	4.029	3.607	0.422
Composición					
3M1BUALC	0.346	0.000	0.297	0.216	<u>0.990</u>
PNTUALC	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
IBA	0.046	0.000	0.040	0.043	0.007
PRPLALC	0.080	0.000	0.068	0.076	0.001
EA	0.096	0.000	0.082	0.092	0.000
H2O	0.433	0.000	0.372	0.415	0.000
BENZENE	0.000	1.000	0.140	0.156	0.001

Nota. Esta tabla muestra las propiedades de flujo y lista de balance de materia en Pro/II Process Engeneering V10.2 de la configuración uno.

4.3.2. Configuración Dos

Las condiciones para la simulación son, la columna de extracción utiliza tres etapas, relación de reflujo de 1 y alimentación en el primer plato. El flujo de masa se modificó para obtener una alta recuperación de alcohol isoamílico asumiendo un valor de 1 kg/hr que resulta en un 80% de recuperación del alcohol en la corriente acuosa 1. La columna de destilación emplea treinta etapas y una relación de reflujo de 2.6, la corriente de compuestos orgánicos recuperados (orgánica 2) y compuestos orgánicos (orgánica 1) se alimentan al plato 16.

La tabla 11 expone los resultados, como se observa en los fondos se obtiene una recuperación de alcohol isoamílico de 95%.

Figura 45.

Esquema de flujo de masa de la configuración dos

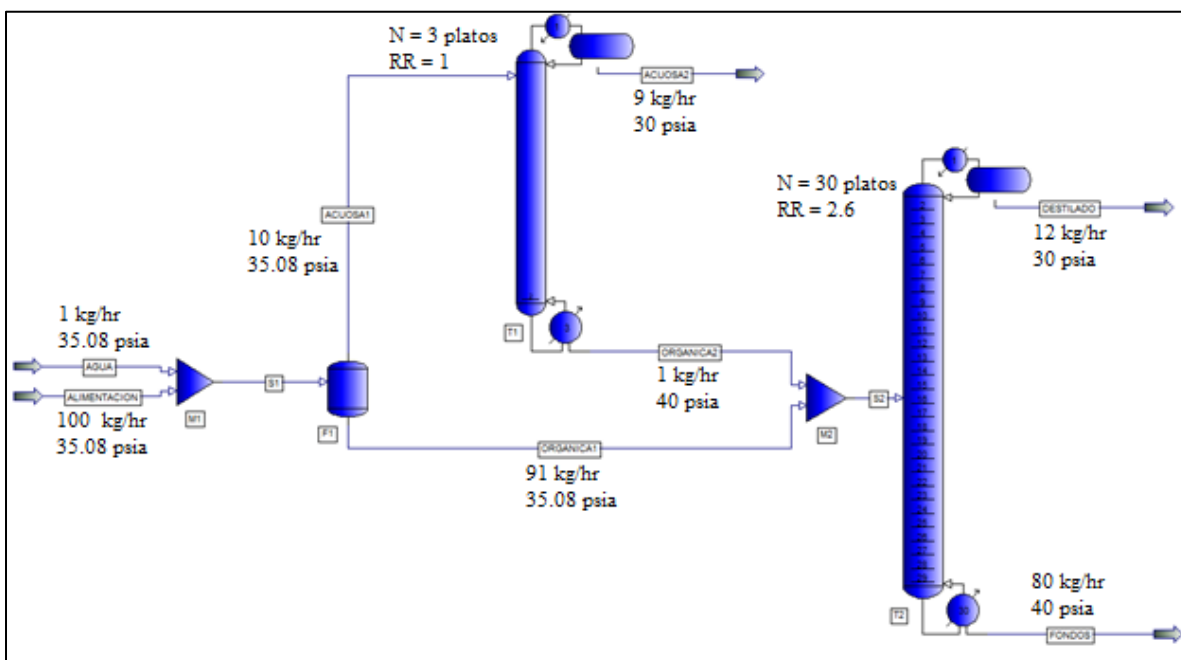


Tabla 11.

Propiedades de flujo – lista de balance de materia (configuración dos)

Nombre de la corriente	AGUA	ALIMENTACIÓN	ACUOSA1	ORGÁNICA1	ACUOSA2	ORGÁNICA2	DESTILADO	FONDO
Fase	Liquido	Liquido	Vapor	Liquido	Liquido	Liquido	Liquido	Liquido
Temperatura (F)	259.50	240.012	268.524	268.524	229.25	288.451	221.97	323.05
Presión (PSIA)	35.080	35.080	35.080	35.080	30.000	40.000	30.000	40.000
Flujo (LB-MOL/HR)	0.122	4.374	4.391	0.106	3.807	0.583	0.114	0.575
Composición								
3M1BUALC	0.000	0.346	0.326	0.749	0.254	0.800	0.000	0.950
PNTYALC	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001
IBA	0.000	0.046	0.045	0.050	0.043	0.058	0.130	0.042
PRPLACL	0.000	0.080	0.078	0.061	0.080	0.062	0.337	0.007
EA	0.000	0.096	0.094	0.038	0.105	0.026	0.169	0.000
H2O	1.000	0.433	0.456	0.101	0.518	0.053	0.364	0.000

Nota. Esta tabla muestra las propiedades de flujo y lista de balance de materia de la simulación en Pro/II Process Engineering V10.2

para la configuración dos.

4.3.3. Configuración Tres

Esta configuración utiliza dos etapas destilación y purificación como se mencionó en la sección 3.8.3. En la simulación los parámetros de operación son una columna de destilación de diez platos, razón de reflujo de 0.35 y plato de alimentación 3; la columna de purificación trabaja con seis platos, razón de reflujo de 2.0 y alimentación en el segundo plato.

En la tabla 12 se presentan los resultados, como se observa en la corriente S6 la recuperación de alcohol isoamílico alcanza una pureza de 99%. En la corriente (S8) de la columna de purificación se visualiza que se elimina los alcoholes inferiores desde C₂ hasta C₄, y en la columna de destilación ingresan corrientes (S3 y S8) enriquecidas en alcoholes C₅.

Figura 46.

Esquema del flujo de masa de la configuración tres

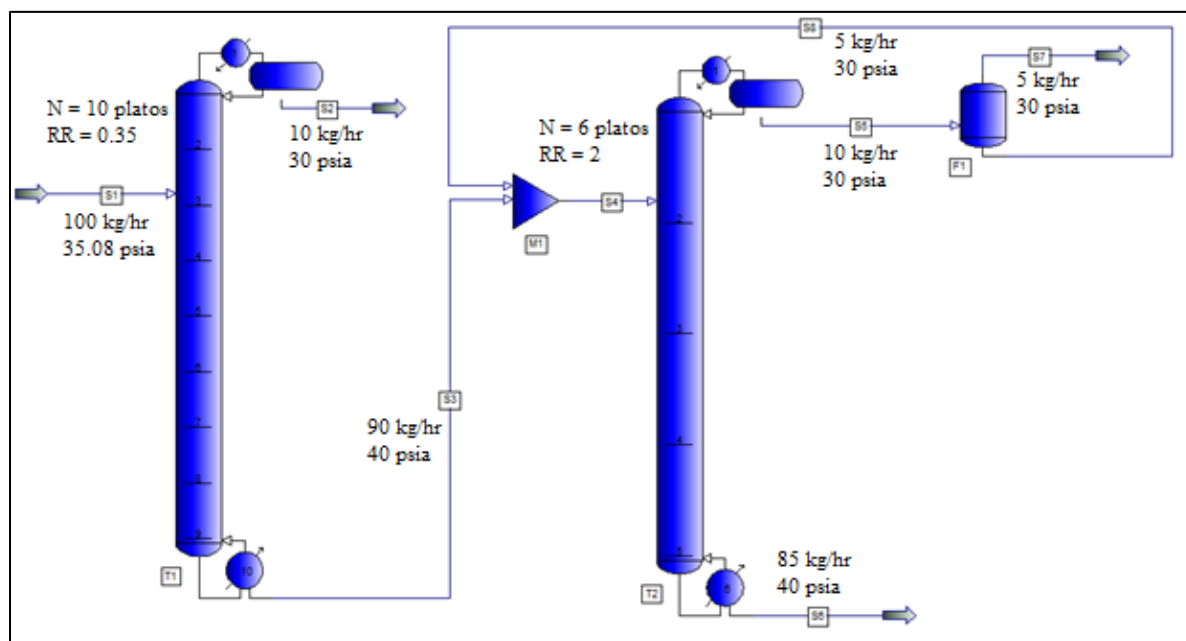


Tabla 12.

Propiedades de flujo – lista de balance de materia (configuración tres)

Nombre de la corriente	S1	S2	S3	S4	S5	S7	S8	S6
Fase	Liquido	Liquido	Liquido	Mezcla	Liquido	Vapor	Liquido	Liquido
Temperatura (F)	240.012	223.901	276.109	268.673	258.189	282.522	282.522	325.702
Presión (PSIA)	35.080	30.000	40.000	30.000	30.000	30.000	30.000	40.000
Flujo (LB-MOL/HR)	4.331	2.556	1.775	2.856	2.092	1.014	1.079	0.764
Composición								
3M1BUALC	0.346	0.086	0.720	0.750	0.663	0.517	0.800	<u>0.990</u>
PNTYALC	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
IBA	0.046	0.030	0.069	0.076	0.101	0.116	0.088	0.007
PRPLALC	0.080	0.073	0.089	0.086	0.117	0.155	0.082	0.002
EA	0.096	0.149	0.018	0.014	0.020	0.032	0.008	0.000
H2O	0.433	0.661	0.103	0.072	0.099	0.181	0.022	0.000

Nota. Esta tabla muestra las propiedades de flujo y lista de balance de materia de la simulación en Pro/II Process Engineering V10.2 para la configuración tres

4.4. Comparación de las configuraciones

La comparación entre las configuraciones se presenta en la tabla 13. La configuración uno es la más rentable en cuanto a costo y recuperación de alcoholes, esto es claro dado que el consumo de una columna de destilación es mucho menor con respecto al uso de un decantador, columna de purificación, extracción y destilación.

Tabla 13.

Resumen de la comparación entre las configuraciones

	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3
TAC \$ (Costo Anual	3928.4	9273.6	12783.4
total) en KWh			
Recuperación (%)	99	95	99

4.5. Análisis HAZOP

El análisis HAZOP se realiza de la configuración más rentable (configuración uno), se toma en cuenta: parámetro, palabra guía, desviación, causas, consecuencias y prevención como se observa en la tabla 14. Esto nos permite evitar accidentes al momento de poner en marcha el equipo y a su vez implementar un plan de manejo y mantenimiento en el caso que se requiera.

Tabla 14.

Análisis HAZOP

Parámetro	Palabra Guía	Desviación	Causas	Consecuencias	Prevención
Flujo	Nada	No existe Flujo.	-Ruptura en la línea de tuberías. -Control de válvula cerrado por el operador. -Daño en la bomba.	- Fuga en las corrientes de entrada. - Parada de la columna. - Pérdida de producción.	- Colocar un sensor de flujo. - Plan de mantenimiento en válvulas, tuberías y bombas. - Contar con un sistema de alarmas.
	Menos	Bajo Flujo.	- Obstrucción en la línea de tuberías. - Cierre parcial de la válvula por el operario	- Baja producción. - Condensación incompleta de los vapores. - Incremento en la presión y temperatura de la columna.	- Controlar las líneas de tubería. - Planificar el lavado del sistema operativo.
Temperatura	Menos	Contenido de la columna más frío de lo necesario.	- Error o falla en el rehervidor. - Corrosión.	- Mala separación de los componentes. - Baja calidad de los productos.	- Revisión periódica de los equipos. - Revestido de goma en los equipos.

Parámetro	Palabra Guía	Desviación	Causas	Consecuencias	Prevención
	Más	Contenido de la columna más caliente de lo esperado.	-Mal funcionamiento del rehervidor. - Error en la lectura de los controladores o sensores de temperatura.	- Alta tasa de corrosión. - Riesgo de toxicidad para las personas.	- Plan de mantenimiento semanal de los sensores
Presión	Más	Mayor presión que lo necesario	- Aumento descontrolado de las corrientes de alimentación - Disminución de la cantidad de flujo en la alimentación	-Disminución en la cantidad de producto. -Mala calidad de producto, no cumple con la especificación deseada.	-Revisar con frecuencia el correcto funcionamiento de los sensores de presión y flujo.
Composición	Menos	Contenido de la columna con menor composición que la deseada	Contaminación presente en la columna. - Plato con presencia de corrosión.	- Baja calidad de producción. - Pérdidas significativas en la producción.	- Tener un plan de limpieza. - Cumplir con la vida útil de los equipos y reemplazarlos de ser necesario.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se deshidrató el aceite de fusel por el método de decantación que representó un método de extracción L – L rápido y eficaz, considerando principalmente que la solución salina enriquece los alcoholes superiores C₅ y absorbe los alcoholes inferiores (C₂ – C₄).

Se determinó la composición química del aceite de fusel deshidratado por la técnica analítica de cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas (GC / MS), la muestra M2 contiene la mayor cantidad de alcohol isoamílico con un área de 52.678 %.

Se determinó las propiedades físicas como color, pH, punto de ebullición, densidad y viscosidad de las muestras analizadas. La muestra con mayor porcentaje de alcohol isoamílico presentó un color de 1.0, pH de 6.05, viscosidad de 9.0 Cp, densidad 0.838 g/cm^3 y un punto de ebullición de 80 °C.

La configuración uno se realizó por destilación azeotrópica, el agente de arrastre que se empleó fue benceno, el cual indujo la división de la fase líquida y cruzó el límite de destilación formado por el azeótropo heterogéneo (alcohol isoamílico, etanol y agua), la recuperación de alcohol isoamílico se dio por el fondo de la columna y alcanzó una pureza del 99%.

En la segunda configuración se usó un decantador que redujo el contenido de agua en la corriente de alimentación, esto facilitó el fraccionamiento del aceite de fusel y evitó la pérdida

de alcohol superior por la adición de agua; por consiguiente, es necesario utilizar la columna de extracción que enriqueció el alcohol isoamílico en un 95%.

En la tercera configuración la columna de destilación eliminó los alcoholes inferiores desde C_2 hasta C_4 , y la columna de purificación recuperó en mayor porcentaje los alcoholes amílicos C_5 ; por lo que se comprobó que en simulación emplear columnas convencionales para los dos procesos enriqueció el alcohol isoamílico al 99%.

Se comparó las configuraciones en cuánto a rendimiento y costos. El mejor arreglo es la configuración uno con un costo total anual mínimo (TAC) en KWh de \$3928.4 y una recuperación de alcohol amílico del 99%.

Se realizó el análisis de riesgos y operabilidad (HAZOP) para el proceso de destilación azeotrópica, en el cual se reporta el plan de mantenimiento antes, durante y después de la puesta en marcha de la columna, y también se especifica el tiempo adecuado para ejecutar el plan de limpieza, estos parámetros nos permiten cumplir con la vida útil de los equipos.

5.2. Recomendaciones

En el análisis cromatográfico diluir las muestras a analizar de manera significativa en relación de 1 en 1000, considerando que en una muestra concentrada no fue posible la correcta identificación de componentes.

Profundizar el estudio de uso de agente de arrastre en destilación azeotrópica heterogénea que permita una mejor recuperación del alcohol isoamílico presente en el aceite de fusel.

Emplear un decantador en la configuración 2 con dos corrientes de alimentación, aceite de fusel crudo y una solución salina saturada ($H_2O + NaCl$), para reducir en mayor porcentaje el contenido de agua presente en la alimentación y así enriquecer los alcoholes amílicos.

Corroborar a escala de laboratorio la simulación de la presente investigación para comprobar el porcentaje de recuperación del alcohol isoamílico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asano, K. (2007). *Mass Transfer: From fundamentals to modern industrial applications*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
- AVEVA Group, (2019). *Product datasheet PRO/II Process Engineering: comprehensive process simulation*. Cambridge, Inglaterra.
- Campoverde, K. y Yunga, M. (2017). *Dimensionamiento de una planta piloto octanaje en gasolinas, a partir de un sub-producto procedente de la destilación del alcohol* (tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Cho, J., y Jeon, J. K. (2006). *Optimization study on the azeotropic distillation process for isopropyl alcohol dehydration*. Korean Journal of Chemical Engineering, 23(1), 1–7.
- DGN. (1998). *BEBIDAS ALCOHÓLICAS DESTILADAS DETERMINACIÓN DE ALCOHOLES SUPERIORES (ACEITE DE FUSEL)*. DESTILLATED ALCOHOLIC BEVERAGES DETERMINATION OF ALCOHOLS HIGHER. (FUSEL OIL)., 1–18.
- Duroudier, J. (2016). *Distillation* (p. 160). Paris, Francia: Elsevier.
- Fernández, G. (2016). Bases: Ingeniería Química. *Academia Minas*, 107–113.
- Ferreira, M., Meirelles, A. y Batista, E. (2013). *Study of the fusel oil distillation process*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 52(6), 2336–2351.
- Foust, A., Wenz, L., Clump, C., Maus, L. y Andersen, L. (1961). *Principios de operaciones unitarias*. México D.F, México: John Wiley and Sons, Inc.
- Górak, A. y Sorensen, E. (2014). *Distillation: fundamentals and principles*. Londres, Inglaterra: Academic Press.
- Harris, D. (2010). *Quantitative chemical analysis*. Nueva York, Estados Unidos: Clancy Marshall.

- Henley, E., Seader, J., Mato, F. y Bartolomé, R. (2000). *Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química*. México D.F, México: Reverté.
- Hopp, V. (2005). *Fundamentos de tecnología química*. Barcelona, España: Reverté.
- Macdonald, D. (2004). *Practical Hazops, Trips and Alarms*. Ciudad del Cabo, Sudáfrica: Elsevier. R
- Marcilla, A., Gómez, A., García, A. y Cayuela, P. (1998). *Introducción a las Operaciones de Separación: Cálculo por etapas de equilibrio*. Alicante, España: Universidad de Alicante.
- Martínez, H. (2018). *Análisis del uso de biocombustibles en Ecuador periodo 2010-2017* (tesis de pregrado). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Martínez, V., Alonso, P., López, J., Salado, M. y Rocha, J. (2000). *Simulación de Procesos en Ingeniería Química*. México D.F, México: Plaza y Valdés editores.
- Martínez, Y., Gallardo, I., López, N. y Morales, M. (2011). *Obtención de alcoholes superiores a partir de fusel mediante proceso de destilación fraccionada*. Centro Azúcar, 38(4), 8–14.
- Mayer, F., Feris, L., Marcilio, N., Staudt, P., Hoffmann, R. y Baldo, V. (2015). *Influence of fusel oil components on the distillation of hydrous ethanol fuel (HEF) in a bench column*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 32(2), 585–593.
- Mayer, F., Feris, L., Marcillo, N., Staudt, P., Hoffmann, R. y Baldo, V. (2014). *Fusel oil influence in ethanol distillation*. Congreso Brasileiro de Engenharia Química, Brasil.
- Mero, V. y Zambrano, L. (2017). *Diseño preliminar de un sistema de deshidratación del aceite de fusel, subproducto de la fabricación de alcohol etílico anhidro*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Montoya, N., Córdoba, F., Trujillo, C., Gil, I. y Rodríguez, G. (2011). *Fusel oil process separation*. AIChE Annual Meeting, American Institute of Chemical Engineers, Minneapolis, MN, 332–337.

- Montoya, N., Durán, J., Córdoba, F., Gil, I., Trujillo, C. y Rodríguez, G. (2016). Colombian fusel oil. *Ingeniería e Investigación*, 36(2), 21–27. Bogotá, Colombia.
- Muñoz, E. y Grau, M. (2013). *Ingeniería química*. Madrid, España: UNED.
- Muñoz, V. y Maroto, A. (2013). *Operaciones unitarias y reactores químicos*. Madrid, España: Editorial de la Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Pérez, J. (2007). *Diseño de una planta para la separación de parafinas lineales procedentes de queroseno* (tesis de pregrado). Universidad de Cádiz, Cádiz, España.
- PQRI. (2014). *Hazard y Operability Analysis (HAZOP)*. Risk Management Training Guides, 1, 1–9.
- Rodríguez, R. y Alvarez, J. (2018). *Aplicación de la química verde para la obtención de bases lubricantes*. Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE, 13(1), 216–219.
- Rodríguez, Y., López, N., Armar, A. y Ley, N. (2017). *Diseño de la etapa de purificación para la obtención de acetato de isoamilo a partir del aceite de fusel*. Tecnología Química, 405–416.
- Scenna, N., Aguirre, P., Benz, S., Chiotti, O., Espinoza, H., Montagna, J., Salomone, H., Tarifa, E. y Vega, J. (2015). *Modelado, simulación y optimización de procesos químicos*. Bogotá, Colombia: Scenna.
- Seider, W., Seader, J., Lewin, D. y Widagdo, S. (2009). *Product and Process Design Principles Synthesis, Analysis, and Evaluation* (Third edition). Brooklyn, Estados Unidos: John Wiley y Sons, Inc.
- Sinnott, R., Coulson, J. y Richardson, J. (2005). *Chemical Engineering Design* (Fourth edition). Oxford, Estados Unidos: Elsevier.
- Skoog, D. A., Holler, F. J. y Nieman, T. (2001). *Principios de análisis instrumental. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis* (Fifth edition). Madrid, España: McGraw-

Hill/Interamericana de España.

Sulaiman, A. y Gasmelseed, G. (2010). *Design of fusel oil separation column using Hysys program*. Sudan Engineering Society Journal, 56(54), 53–60.

Treybal, R. (1997). *Operaciones de Transferencia de Masa* (2nd ed.). México: Mc Graw Hill.

Universidad Politécnica de Cataluña. (2009). *Fundamentos teóricos-Tipos de platos*. Escolar Politécnica Superior d'Enginyeria de Manresa: Cataluña, España.

Webb, A. y Ingraham, J. (1963). *Fusel Oil*. *Advances in Applied Microbiology*, 5, 317–353.

Weissermel, K. y Arpe, H. (1981). *Química orgánica industrial : productos de partida e intermedios más importantes*. Madrid, España: Reverté.

ANEXOS