

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

**INFORME DE MATERIA INTEGRADORA**

“DISEÑO PRELIMINAR DE UN SISTEMA DE  
DESHIDRATACIÓN DEL ACEITE DE FUSEL,  
SUBPRODUCTO DE LA FABRICACIÓN DE ALCOHOL  
ETÍLICO ANHIDRO”

Previo a la obtención del título de  
**INGENIERO QUÍMICO**

Autores

**ERIKA VIVIANA MERO MERO**  
**LISKEN NONOY ZAMBRANO RÍOS**

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO 2017

## RESUMEN

El presente trabajo consiste en encontrar el procedimiento más óptimo para remover el contenido de agua presente en el aceite de fusel, subproducto de la producción de etanol anhidro. La investigación se divide en cinco fases: caracterización del aceite de fusel crudo, tratamiento del aceite de fusel, selección del proceso óptimo, caracterización del aceite de fusel refinado y dimensionamiento del proceso de deshidratación. La primera fase consiste en la caracterización del aceite de fusel de las destilerías nacionales con el fin de elegir la muestra representativa para el desarrollo del proyecto. En la segunda fase se efectúa el tratamiento del aceite de fusel mediante cuatro metodologías: adsorción empleando zeolitas y sílica gel, extracción líquido – líquido, rotoevaporación y tratamiento con agente desecante. En la tercera fase se compara los resultados obtenidos en cada tratamiento; para así, elegir el tratamiento idóneo basándose en costos de materia prima y el porcentaje de remoción de agua. Luego, en la cuarta se realizan pruebas correspondientes de caracterización del aceite de fusel refinado, como viscosidad, punto de inflamación, densidad, entre otras. Finalmente, se procede a dimensionar los equipos del proceso de deshidratación del aceite de fusel con base al método elegido y la producción anual de aceite de fusel a nivel nacional.

**Palabras clave:** aceite de fusel, deshidratación, dimensionamiento, sistema

## ABSTRACT

The present project is about find the best procedure to remove water content in fusel oil. This investigation divided in five phases: characterization of raw fusel oil, treatment of fusel oil, selection the best process, characterization of refined fusel oil and, sizing of dehydration process. The first phase consist in the characterization of fusel oil from three nationals distilleries with the purpose to choose a representative sample in order to develop project. In the second phase is carried out the treatment of fusel oil through four methodologies: adsorption using zeolites and silica gel, liquid-liquid extraction, rotoevaporator and treatment with desiccant agent. In the third phase compares the obtained results in each treatment applied, in order to choose the suitable process based on raw material costs and water percent removed. Then, in the fourth phase are performed refined fusel oil characterization tests, as viscosity, flashpoint, density and others. Finally, it proceed to sizing dehydration process equipment based on chosen method and annual production of fusel oil at national level.

**Keywords:** fusel oil, dehydration, sizing, system

## DEDICATORIA

A mis padres, Alexandra y Cristóbal, quienes son mi roca, mi luz y mi guía desde el día en que nací. Mi mayor ejemplo a seguir y quienes me dan fuerzas para seguir adelante.

A mis hermanos, Alisson y Alexander, quienes son mi mayor motivación para superarme. Los amo infinitamente.

A mi familia, quienes han estado ahí en cada momento.

Y a mis amigos, que han hecho inolvidable la etapa universitaria.

Erika Mero

A Dios por su infinito amor que fortalece mi alma y reivindica mi espíritu.

A mis padres, Calixto y Mercedes, quienes amo profundamente y son mi faro y motivación; gracias por confiar y hacer de mí, una mujer sensible y audaz.

A mi hermana, Mishelle, quién se convirtió en mi alma gemela, mi persona incondicional, mi confidente.

A mi familia y amigos que hice en el camino, quienes han dejado un legado en mi corazón.

A los docentes del Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales, por hacer del salón de clases un espacio de risas y aprendizaje.

Nonoy Zambrano

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, a Dios, por ser la fuerza espiritual en nuestra debilidad.

A nuestros padres, por apoyarnos incondicionalmente y ser nuestro soporte en todo este largo camino.

A nuestro tutor, Msc. Raúl Serrano, por su guía, apoyo, dedicación en el desarrollo del proyecto y sobre todo por convertirse en nuestro amigo.

Al personal de SODERAL S.A. por estar predispuestos siempre a ayudarnos, especialmente al Ing. Ivan Mejia, quien estuvo pendiente del desarrollo de toda la investigación.

A Codana, Producargo, CIBE, Laboratorio de Hidrocarburos de ESPOL y Refinería La Libertad por su aporte.

A nuestros profesores, quienes han contribuido en nuestra formación profesional.

A nuestros amigos, quienes han compartido con nosotras en la etapa universitaria.

Erika Mero y Nonoy Zambrano

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Erika Viviana Mero Mero

Lisken Nonoy Zambrano Ríos

Y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

---

Erika Viviana Mero Mero

---

Lisken Nonoy Zambrano Ríos

## ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ARCH	Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífico
ASTM	American Society for Testing and Materials
CIBE	Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador
Codana S.A.	Cooperación de destilería nacional S.A.
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FID	Flame Ionization Detector
GL	Grados Gay Lussac
HBF	High Boilling Fraction (Fracción de alto punto de ebullición)
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
LBF	Low Boilling Fraction (Fracción de bajo punto de ebullición)
Producargo S.A	Productora de Alcoholes S.A.
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
RON	Research Octane Numer
Soderal S.A.	Sociedad de Destilación de Alcoholes S.A.
TIR	Tasa interna de retorno
TMAR	Tasa mínima atractiva de retorno
VAN	Valor actual neto

## TABLA DE CONTENIDO

Dedicatoria I	
AGRADECIMIENTO .....	II
ACRÓNIMOS Y SIGLAS.....	IV
tabla de contenido .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 .....	4
1. MARCO TEÓRICO .....	4
1.1. Separación del aceite de fusel del proceso de obtención de etanol anhidro ..	4
1.2. Producción nacional de aceite de fusel .....	5
1.3. Aceite de fusel.....	6
1.1.1. Origen del aceite de fusel .....	6
1.1.2. Composición del aceite de fusel .....	8
1.1.3. Propiedades del aceite de fusel .....	9
1.1.4. Usos del aceite de fusel .....	11
1.2. Tratamiento del aceite de fusel .....	16
1.2.1. Adsorción.....	16
1.2.2. Pervaporación.....	20
1.2.3. Rotoevaporador .....	21
1.2.4. Extracción líquido – líquido.....	23
1.2.5. Tratamiento con sales desecantes .....	24
CAPÍTULO 2 .....	26
2. mETODOLOGÍA.....	26
2.1. Diseño experimental .....	26
2.2. Caracterización del aceite de fusel sin tratamiento (crudo).....	27
2.2.1. Grados Gay Lussac .....	27
2.1.2. Cromatografía de gases.....	28
2.3.3. Contenido de agua .....	29



2.3.	Tratamiento de deshidratación.....	30
2.3.1.	Rotoevaporador .....	30
2.3.2.	Adsorción.....	31
2.3.3.	Extracción liquido – líquido .....	34
2.3.4.	Tratamiento con sulfato de sodio.....	36
2.3.5.	Procesos combinados .....	36
2.4.	Caracterización del aceite de fusel refinado .....	37
2.4.1.	Presión de vapor Reid .....	37
2.4.2.	Destilación ASTM .....	37
2.4.3.	Punto de inflamación .....	38
2.4.4.	Viscosidad cinemática .....	38
CAPÍTULO 3 .....		40
3.	RESULTADOS .....	40
3.1.	Caracterización del aceite de fusel crudo .....	40
3.2.	Pre-tratamiento del aceite de fusel con alto contenido de agua (muestra 3) .....	41
3.3.	Tratamiento del aceite de fusel .....	43
3.3.1.	Resultados de experimentación con rotoevaporador .....	43
3.3.2.	Resultados de experimentación de adsorción.....	44
3.3.3.	Resultados de experimentación de la extracción líquido-líquido .....	48
3.3.4.	Resultados de experimentación con sulfato de sodio anhidro .....	49
3.4.	Caracterización del aceite de fusel refinado .....	51
3.5.	Prueba del uso del producto como bioaditivo .....	51
CAPÍTULO 4 .....		72
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	72
4.1.	Selección del método.....	53
4.1.1.	Métodos combinados.....	54
4.1.2.	Análisis de costos de la materia prima .....	56
4.2.	Dimensionamiento del proceso .....	58
4.2.1.	Tanques de recepción .....	58
4.2.2.	Pre-mezcla de materia prima .....	59
4.2.3.	Preparación de salmuera .....	59
4.2.4.	Extracción líquido – liquido .....	60

4.2.5. Tratamiento con sulfato de anhídrido .....	60
4.2.6. Tanque de almacenamiento de producto terminado .....	61
4.2.7. Tanque de residuo .....	61
4.2.8. Cálculo de dimensiones de tanques .....	61
4.3. Dimensionamiento de tuberías .....	62
4.4. Dimensionamiento de bombas .....	63
4.3. Dimensionamiento de motor .....	63
4.4. Diagrama de Flujo de Proceso (PFD) .....	64
4.5. Análisis de costos .....	66
4.5.1. Inversión inicial .....	66
4.5.2. Costos de equipos .....	66
4.5.3. Capital fijo .....	67
4.5.4. Costos de la producción.....	68
4.5.5. Rentabilidad del proyecto .....	69
CAPÍTULO 5 .....	71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	71
5.1. Conclusiones .....	71
5.2. Recomendaciones.....	72
Referencias .....	73
GLOSARIO	76
ANEXOS	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de fases agua/etanol/alcohol iso-amílico.....	5
Figura 1.2. Vía de Ehrlich .....	8
Figura 1.3. Sistema de adsorción típico de dos lechos .....	17
Figura 1.4. Estructura de las zeolitas .....	19
Figura 1.5. Componentes de un rotaevaporador .....	21
Figura 1.6. Puntos de ebullición del agua a diferentes presiones .....	22
Figura 1.7. Sistema de extracción líquido – líquido de n etapas a contracorriente....	23
Figura 2.1. Esquema de experimentación .....	26
Figura 2.2. Muestras de aceite de fusel .....	27
Figura 2.3. Densímetro digital DMA 48 .....	28
Figura 2.4. Equipo para cromatografía de gases HP 5890 .....	28
Figura 2.5. Centrifuga universal.....	29
Figura 2.6 Equipo rotoevaporador.....	30
Figura 2.7. Sistema de adsorción zeolita – aceite de fusel.....	33
Figura 2.8. Ciclo del sistema de adsorción: aceite de fusel – sílica gel.....	34
Figura 2.9. Separación de fases aceite de fusel- salmuera .....	35
Figura 2.10. Sal hidratada (izquierda), sal recuperada (derecha).....	36
Figura 3.1. Balance en el rotoevaporador .....	44
Figura 4.1 Esquema del Método combinado Extracción L-L .....	56
Figura 4.2. Esquema del Método combinado sílica gel .....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Producción actual de aceite de fusel en el Ecuador .....	6
Tabla 1.2. Composición del aceite de fusel de bajo punto de ebullición (LBF) .....	9
Tabla 1.3. Propiedades físico-químicas de los componentes principales del aceite de fusel. ....	11
Tabla 1.4. Zonas de ebullición de solventes .....	13
Tabla 1.5. Comparación de las propiedades entre zeolitas y sílica gel .....	20
Tabla 2.1. Relación aceite de fusel/ agente adsorbente .....	30
Tabla 3.1. Contenido de agua y GL del aceite de fusel crudo .....	40
Tabla 3.2. Composición (%) del aceite de fusel crudo .....	41
Tabla 3.3. Resultados del pretratamiento (Muestra 3) .....	41
Tabla 3.4. Contenido de agua (muestra 3) .....	42
Tabla 3.5. Mezclas entre muestras de aceite de fusel .....	43
Tabla 3.6. Contenido de agua en las fases obtenidas del rotoevaporador .....	43
Tabla 3.7. Porcentaje de agua alcanzado en adsorción con zeolitas .....	44
Tabla 3.8. Porcentaje de agua alcanzada en adsorción con sílica gel .....	46
Tabla 3.9. Efectos de la temperatura en la adsorción con sílica gel .....	47
Tabla 3.10. Contenido de agua en la extracción líquido - líquido .....	48
Tabla 3.11. Resultados del contenido de agua al tratar sulfato de sodio .....	50
Tabla 3.12. Rendimiento en la deshidratación con sulfato de sodio .....	50
Tabla 3.13. Propiedades del aceite de fusel refinado .....	51
Tabla 3.14. Resultados del uso como bioaditivo en gasolina del aceite de fusel.....	51
Tabla 4.1 Ventajas y desventajas de cada método .....	53
Tabla 4.2 Rendimiento de cada método.....	53
Tabla 4.3. Concentración de agua en el refinado .....	55
Tabla 4.4. Porcentaje de agua en el fusel con post-tratamiento .....	55
Tabla 4.5. Costos de la materia prima empleada .....	57
Tabla 4.6. Costo total para deshidratar aceite de fusel por el método combinado de extracción L-L .....	57

Tabla 4.7. Costo total para deshidratar aceite de fusel por el método combinado sílica gel .....	57
Tabla 4.8. Costo total para deshidratar aceite de fusel .....	58
Tabla 4.9. Producción diaria de aceite de fusel .....	58
Tabla 4.10. Volumen contenido en tanques de recepción .....	59
Tabla 4.11. Volumen requerido por etapa de extracción L-L .....	60
Tabla 4.12. Dimensiones de los tanques .....	62
Tabla 4.13. Ubicación de las tuberías .....	62
Tabla 4.14. Dimensiones de las tuberías .....	63
Tabla 4.15. Potencia de bombas .....	63
Tabla 4.16. Potencia de motores .....	64
Tabla 4.17. Costos de tanques de almacenamiento .....	67
Tabla 4.18. Costos de bombas .....	67
Tabla 4.19. Costo de los equipos principales .....	67
Tabla 4.20. Factores para estimar costos directos .....	68
Tabla 4.21. Factores para estimar costos indirectos .....	68
Tabla 4.22. Resultados del capital total requerido.....	68
Tabla 4.23. Costos de operación .....	69
Tabla 4.24. Flujo de caja .....	70
Tabla 4.25. Resultados de rentabilidad del proyecto .....	70

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1. Variación de remoción de contenido de agua en función de la temperatura.....	48
Gráfica 3.2. Variación de la remoción del contenido de agua y rendimiento respecto a la temperatura.....	49
Gráfica 4.1. Porcentaje de remoción de agua por cada método .....	54

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha recurrido a la biotecnología para darle valor agregado a los subproductos generados en procesos industriales, obteniendo resultados ecológicamente amigables y con gran rentabilidad económica.

El aceite de fusel es un residuo que se recoge en la rectificación de las destilerías de alcohol, cuyos rendimientos varían entre 1 y 5 L por cada 1000 L de etanol anhidro. Estas cantidades dependen del sustrato utilizado, sustancias nitrogenadas agregadas y las condiciones de fermentación y destilación aplicadas.

Los recientes estudios sobre los usos del aceite de fusel reportan de manera general la utilización de éste en la industria de cosméticos, como fijador y aromatizante, en la industria agrícola como herbicida y en la industria de pinturas como solvente industrial. (Andréa de Padua, 2011). En esa misma dirección, a principios de los años 20 se empezaron a añadir compuestos oxigenados como los éteres y alcoholes a las gasolinas, llegando a la conclusión que la adición de compuestos oxigenados en diferentes concentraciones a los carburantes modifican las propiedades de estos, como por ejemplo el número de octano, que en este caso se eleva mejorando la capacidad antidetonante de los carburantes. (Palencia, 2014).

El proceso de recuperación con fines comerciales del aceite de fusel se basa en la deshidratación del aceite de fusel o la separación de los diferentes alcoholes mediante destilación fraccionada. (Pérez, 2010)

En el siguiente proyecto titulado “**Diseño preliminar de un sistema de deshidratación del aceite de fusel, subproducto de la fabricación de alcohol etílico anhidro**”, se tratará de desarrollar un proceso que permita remover el contenido de agua en el aceite de fusel, de manera que dicho parámetro esté dentro de los límites establecidos por varias normativas INEN de solventes y bioaditivos.

La presencia de agua en el aceite de fusel es el principal inconveniente que limita su uso debido a que genera problemas de corrosión y conlleva a que el valor comercial sea muy bajo, aproximadamente 0.05 dólares el litro, siendo Colombia y Brasil los principales compradores. Actualmente, dentro del país no se aprovecha el potencial económico que tiene el aceite de fusel y no hay una gestión de éste como efluente. Es por esto, que en el presente estudio se va a deshidratar el aceite de fusel con el fin de darle valor agregado.

Investigaciones anteriores han demostrado que el aceite de fusel constituido por una mezcla de alcoholes superiores, en su mayoría isobutanol e isoamílico, representa una alternativa ecológica como aditivo, que eleva el octanaje de las gasolinas y como solvente en la fabricación de lacas y esmaltes. Con este antecedente se plantea elegir el método que remueva el mayor contenido de agua del aceite de fusel para su posterior uso a nivel industrial.

En la actualidad la mayoría de las investigaciones buscan obtener los compuestos presentes en el aceite de fusel, que son altamente valorizados; son pocos los trabajos enfocados en utilizar el aceite de fusel puro. Una manera de aprovechar los beneficios del aceite de fusel es remover el contenido de agua para su posterior uso como aditivo o solvente, haciendo uso de diferentes métodos que logren deshidratarlo hasta niveles considerables y que presenten viabilidad técnica, económica y ambiental.

Además al aumentar la producción de etanol de igual manera crecen los subproductos obtenidos del proceso de destilación. En Ecuador, la producción anual de etanol tiene un valor aproximado de 95 millones de litros, que deja un residuo de 365 mil litros de aceite de fusel, con esta referencia se plantea el dimensionamiento de una planta para remover el contenido de agua del aceite de fusel para su posterior uso como aditivo.

La hipótesis de este proyecto es: A través de la presente investigación, se intentará desarrollar un proceso que permita remover el contenido de agua en el aceite de



fusel por debajo del 0.05% v/v, de manera que dicho parámetro este dentro de los límites establecidos por varias normativas INEN de solventes y combustibles.

El objetivo general de este proyecto es Dimensionar un sistema para reducir el contenido de agua presente en el aceite de fusel que se produce localmente, siendo los objetivos específicos: 1) Caracterizar el aceite de fusel proveniente de tres empresas nacionales productoras de alcohol; 2) Evaluar diferentes métodos para la deshidratación del aceite de fusel; 3) Seleccionar el procedimiento más adecuado para tratar el aceite de fusel y disminuir en un 0,05% el contenido de agua; 4) Analizar las propiedades del aceite de fusel ya tratado que lo establecen como bioaditivo y solvente y 5) Estimar los costos y la rentabilidad del proyecto.

# **CAPÍTULO 1**

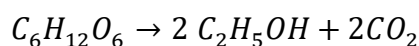
## **MARCO TEÓRICO**

## 1.1. Separación del aceite de fusel del proceso de obtención de etanol anhidro

En nuestro país, se produce etanol anhidro a partir de la melaza de caña de azúcar. Las principales etapas del proceso de obtención de etanol son:

- a) Fermentación
- b) Destilación
- c) Deshidratación

El proceso empieza con la adecuación de la melaza para cumplir con los parámetros de la fermentación, una vez la materia prima esté lista, se pasa a la etapa de fermentación, el cual es un proceso bioquímico efectuado por las levaduras, que dan lugar a numerosas reacciones químicas, siendo la reacción principal:

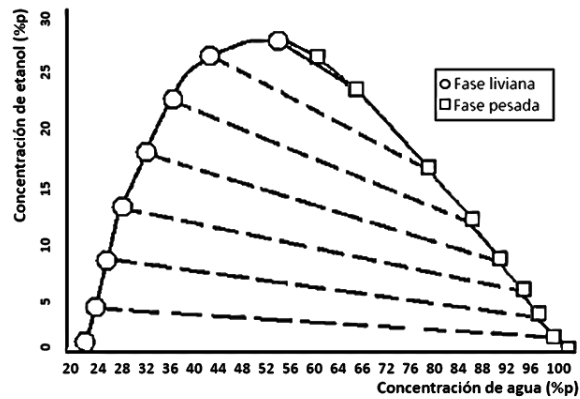


Esta etapa es la de mayor cuidado, porque es en donde se genera el producto deseado. Las condiciones de operación son críticas para el desempeño y desarrollo de las levaduras.

La corriente obtenida de la fermentación es llamada vino. El vino es llevado a la fase de destilación, en donde se van a separar los componentes (etanol, aldehídos, acetatos, alcoholes pesados, etc). La corriente de cola de las columnas rectificadoras es enviada a grandes tanques de almacenamiento. En esta fase se obtiene etanol a 95% v/v. Esta última corriente se lleva a la etapa de deshidratación, donde se obtiene etanol a una pureza de 99,5 % mediante técnicas de adsorción con tamices moleculares, destilación azeotrópica, destilación extractiva o pervaporación.

En la primera columna rectificadora, la separación se basa en las variaciones de concentración de etanol en el aceite de fusel. A mayor concentración de etanol, el aceite de fusel es menos volátil que el etanol y con menor concentración de etanol, el aceite de fusel es el más volátil de los dos. El aceite de fusel tiene a acumularse en la región de rectificación donde la concentración de etanol es aproximadamente 40 – 47% v/v. (Garcia, 2008)

La otra peculiaridad de la separación del aceite de fusel se puede explicar con ayuda del siguiente diagrama (ver Figura 1.1) para el sistema de agua/etanol/alcohol iso-amílico a 30°C. Se considera al aceite de fusel análogo al alcohol iso-amílico.



**Figura 1.1. Diagrama de fases agua/etanol/alcohol iso-amílico**

*Fuente:* (Patil, Butala, & Koolwal, 2002)

Dependiendo de la región de la curva de equilibrio, el aceite de fusel puede moverse hacia dentro o afuera de la región bifásica en función de la temperatura de operación y de la concentración de etanol en el plato de la columna (que se determina por balance de materia y energía de la columna, en función del flujo de vapor y la razón de reflujo de operación de la columna). (Küçük & Ceylan, 1998)

## 1.2. Producción nacional de aceite de fusel

El Ecuador como parte de su estrategia de transformación de la matriz productiva, ha dispuesto como objetivo la producción de 400 millones de litros anuales de etanol para biocombustibles. (ProEcuador, 2013). En la Tabla 1.1 se muestra la producción actual de etanol y aceite de fusel de las 3 destilerías más grandes de nuestro país (Soderal S.A., Producargo S.A y CODANA S.A.)

**Tabla 1.1. Producción actual de aceite de fusel en el Ecuador**

<b>Destilería de Alcohol</b>	<b>Producción de etanol (litros/día)</b>	<b>Producción de aceite de fusel (litros/día)</b>	<b>Producción de aceite de fusel (litros/año)</b>
<b>SODERAL S.A</b>	150000	250	91250
<b>PRODUCARGO</b>	60000	600	219000
<b>CODANA S.A</b>	50000	150	54750
<b>TOTAL</b>	260000	1000	365000

*Fuente: SODERAL S.A, PRODUCARGO, CODANA S.A; 2017*

*Elaborado por: Mero & Zambrano*

### **1.3. Aceite de fusel**

El aceite de fusel es una mezcla de alcoholes de alto peso molecular (superior al del etanol), que se obtiene como sub-producto de la fermentación alcohólica. Generalmente, los principales componentes del aceite de fusel son los alcoholes iso-amílico, iso-butílico y n-propílico; mientras que los alcoholes n-amílico, n-butílico e iso-propílico se encuentran en cantidades menores.

El aceite de fusel se lo comercializa de dos formas: aceite de fusel crudo y aceite de fusel refinado. El aceite de fusel crudo proviene directamente de la corriente del proceso de destilación continua de etanol anhidro; mientras que, el aceite de fusel refinado, es un aceite tratado libre de impurezas como agua o alcoholes grasos.

#### **1.1.1. Origen del aceite de fusel**

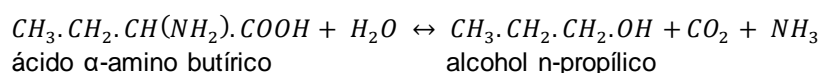
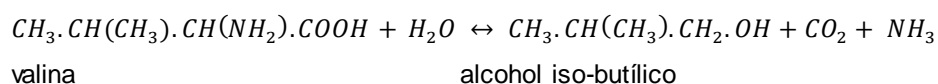
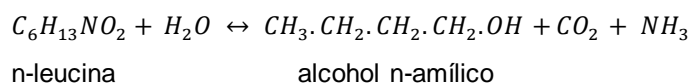
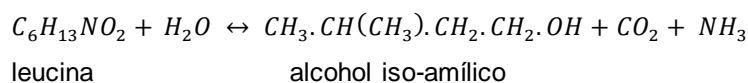
La calidad y cantidad del aceite de fusel generado durante la producción de etanol anhidro depende de varios factores como el origen de la materia prima, del tipo y método de preparación del caldo usado para la fermentación, las características de la levadura, sustancias nitrogenadas, tiempo de fermentación las condiciones y ambiente, bajo las cuales la fermentación procede, el método de remoción del aceite

de fusel. Si en la mezcla inicial están presentes las fuentes de nitrógeno de fácil asimilabilidad, tales como aspargina o sales de amonía, la división de los aminoácidos se reduce en gran cantidad, y por ende la formación de aceite de fusel es menor. (Patil, Butala, & Koolwal, 2002)

Existen muchas teorías para explicar cómo se forman los alcoholes superiores durante la fase de fermentación. El origen de estos alcoholes es por el azúcar presente en el mosto a fermentar, de lo que se creía que se formaban, por la propia levadura o por las bacterias presentes; mientras que, otros estudios demuestran que su formación se debe a la reducción de ácidos grasos. (García, 2008)

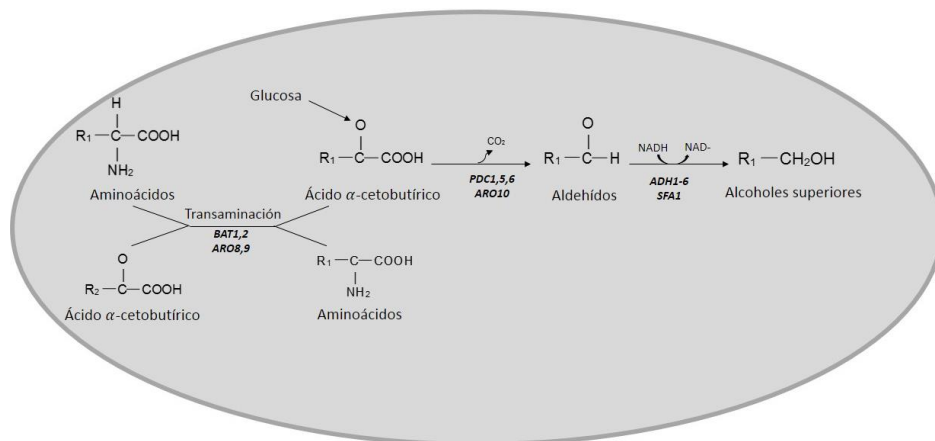
Fue Ehrlich (ver Figura 1.2) quien demostró en su investigación clásica que los principales alcoholes superiores y probablemente también los aldehídos, que se encuentran en el aceite de fusel son derivados de los aminoácidos que se forman por la hidrólisis de las proteínas presentes en el mosto. (Brau, 1957)

Las reacciones químicas implicadas en la desaminación de los aminoácidos que dan lugar a los componentes principales del aceite de fusel, son las siguientes:



El amoniaco formado por las reacciones, es usado por la levadura para la formación de materia albuminosa. La formación de alcohol consiste en tres pasos:

- ✓ Transaminación de los aminoácidos con sus correspondientes oxoácidos ramificados.
  - ✓ Descarboxilación de los oxoácidos para obtener aldehídos.
  - ✓ Reducción de los aldehídos a los alcoholes correspondientes.
- (Marin, 2016)



**Figura 1.2. Vía de Ehrlich**

*Fuente:* (Mendes-Ferreira, Barbosa, Patricia, & Mendes-Faia, 2011)

### 1.1.2. Composición del aceite de fusel

Según un estudio realizado por Patil en el 2002, la composición del aceite de fusel se puede reportar como:

- ✓ Fracción de bajo punto de ebullición (LBF, por sus siglas en inglés “Low Boilling Point”): fracción con punto de ebullición por debajo de  $132^\circ\text{C}$  a 1 atm de presión.
- ✓ Fracción de alto punto de ebullición (HBF, por sus siglas en inglés “High Boilling Fraction”): fracción con punto de ebullición por encima de  $132^\circ\text{C}$  a 1 atm de presión.

La “LBF” constituye una mayor fracción de aceite de fusel generalmente entre 95-98% v/v. La composición del aceite de fusel LBF puede ser determinada con precisión mediante técnicas cromatográficas de gas – líquido. En la tabla 1.2 se muestra la composición del aceite de fusel provenientes de cuatro destilerías identificadas como 1, 2, 3 y 4, en

donde se puede observar que la proporción de alcoholes alifáticos difiere ampliamente. (Patil, Butala, & Koolwal, 2002)

**Tabla 1.2. Composición del aceite de fusel de bajo punto de ebullición (LBF)**

Componentes	Muestras			
	1	2	3	4
	%v/v	%v/v	%v/v	%v/v
Agua	18.00	5.93	5.15	30.00
Etanol	8.00	1.23	0.057	7.90
Isopropanol	0.50	19.00	2.23	1.50*
n-propanol	18.00	3.20	0.25	.
Isobutanol	5.50	1.83	0.227	3.40
n-butanol	6.00	4.53	0.366	4.40
Isoamílico	41.00	60.00	85.23	46.80
n-amílico	3.00	-	-	-
Acidos libres	0.01	-	-	-
Acetato	-	1.33	0.124	-
Isobutirato de etilo	-	0.73	0.163	-
Correspondiente a HBF	0.00	2.22	4.00	2.00

\*Reportado como propanol

Fuente: Patil, 2002

De igual manera, la fracción de alto punto de ebullición “HBF” ha sido estudiada por muchos investigadores, existe diferencia en la manera de presentar sus resultados debido al hecho de que los métodos de análisis de aceite de fusel difieren (destilación fraccionada, métodos químicos o una combinación de ambos). Los compuestos que generalmente se encuentran en la fracción de alto punto de ebullición son: Alcoholes desde C<sub>6</sub>, furfural, esteres del alcohol n-amílico. (Garcia, 2008)

### 1.1.3. Propiedades del aceite de fusel

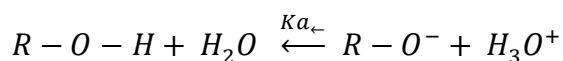
El aceite de fusel, generalmente, es un líquido aceitoso, ámbar, amarillo o marrón, volátil, con un sabor desagradable y olor asfixiante



característico. Las propiedades físico-químicas del aceite de fusel no se encuentran definidas en la literatura, ya que éstas van a depender de la composición del mismo. Es probable, que las propiedades sean muy cercanas a las del alcohol iso-amílico, ya que generalmente es el compuesto de mayor peso en la composición del aceite de fusel.

La solubilidad de los alcoholes varía de acuerdo al tamaño de la cadena y a la cantidad de grupos hidroxilos presentes en un determinado alcohol. El grupo hidroxilo (O-H) es hidrofílico, es decir, que tiene afinidad por el agua y otras sustancias polares; mientras que, el grupo alquilo (C-H) es hidrofóbico, el cual le da al alcohol mayor solubilidad en disolventes orgánicos no polares. Así que, mientras más largo sea el grupo alquilo la solubilidad en agua va a disminuir.

La acidez de los alcoholes varía en gran medida, existen alcoholes tan ácidos como el agua y algunos que son menos ácidos. La ecuación de equilibrio que define la constante de disociación ácida  $K_a$ , es la siguiente:



Donde,  $K_a = \frac{[H_3O^+][R-O^-]}{[ROH]}$  y,  $pK_a = -\log(K_a)$

Si aumenta la sustitución en los grupos alquilo la acidez tiende a disminuir, debido a que una mayor sustitución de los grupos alquilo inhibe considerablemente la solvatación del ion alcóxido (R-O<sup>-</sup>), lo cual ocasiona que el equilibrio se desplace hacia la izquierda. (Wade, 2011) Los puntos de ebullición de los alcoholes son más altos que los de los éteres y alcanos con masa molecular similar, esto se debe a que los alcoholes son capaces de formar puentes de hidrógeno por tener el grupo O-H en su estructura; estos enlaces son lo suficientemente fuertes para que las moléculas necesiten más energía para separarse y alcanzar su punto de ebullición. El punto de ebullición en los alcoholes

es superior conforme aumenta su masa molecular, y para alcoholes con el mismo número de carbonos el punto de ebullición disminuye si aumentan las ramificaciones. (Acuña, 2006)

En la Tabla 1.3 se muestran algunas propiedades de los componentes que generalmente están presentes en el aceite de fusel.

**Tabla 1.3. Propiedades físico-químicas de los componentes principales del aceite de fusel.**

Propiedad	n-propanol	i-propanol	i-butanol	i-amílico	Amílico
Punto de ebullición (°C)	97,00	83,00	108,00	132,00	138,00
Punto de fusión(°C)	-127,00	-90,00	-108,00	-117,00	-79,00
Solubilidad en agua a 20°C (g/100 mL)	Miscible	Miscible	8,70	2,50	2,20
Acidez (pK <sub>a</sub> )	16,00	16,50	18,0	-	-
Punto de inflamación (°C)	15,00	11,70	28,00	45,00	43,00
Temperatura de autoignición(°C)	371,00	456,00	415,00	350,00	320,00
Densidad relativa (agua=1)	0,80	0,79	0,80	0,80	0,80
Densidad relativa de vapor (aire=1)	2,10	2,10	2,55	3,00	3,00
Presión de vapor a 20°C (kPa)	2,00	4,40	1,20	0,40	0,60

*Fuente: Fichas técnicas del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), España*

#### 1.1.4. Usos del aceite de fusel

A continuación se describen brevemente, los principales usos del aceite de fusel:

- ✓ Recuperación de alcoholes alifáticos superiores de aceite de fusel, ya que el alcohol iso-amílico es el componente principal del aceite

de fusel, este aceite se usa principalmente en ensayos de leche o como disolvente industrial para una variedad de resinas y materiales aceitosos. Los alcoholes butílico y propílico son usados principalmente como solventes industriales para lacas e impresión.

- ✓ Obtención de ésteres orgánicos e inorgánicos: algunos componentes del aceite de fusel, principalmente los alcoholes butílico, propílico y amílico son aprovechados para obtener ésteres, los cuales se emplean como solventes extractores, agentes aromatizantes, medicinales y plastificantes. (Brau, 1957)
- ✓ Para producir un copolímero mediante el calentamiento del aceite de fusel con hidrocarburos aromáticos vinílicos que son usados en la preparación de revestimientos, pinturas y barnices.
- ✓ Obtención de esmalte de uñas mediante alcoholes iso-butílico y amílico.
- ✓ Como aditivo en derivados del petróleo y fluidos hidráulicos: se utiliza como aditivo en el diésel para mejorar el índice de cetano, para elevar el octanaje de la gasolina; forma un combustible limpio al mezclarse con diésel o aceite de calefacción, usados en maquinaria agrícola o en generadores eléctricos, mejora las propiedades anticorrosivas de los líquidos de freno. (Patil, Butala, & Koolwal, 2002)

El presente trabajo se orienta hacia el uso del aceite de fusel como solvente y aditivo.

#### 1.1.4.1. Aceite de fusel como solvente

Los disolventes son líquidos que se emplean para darle consistencia a la pintura y disolver aglutinantes orgánicos e inorgánicos sin sufrir cambios químicos. Entre las propiedades que caracterizan a un disolvente se tiene:

- ✓ Índice de evaporación: da una idea clara de la velocidad de evaporación de los disolventes, para ello se divide el tiempo de evaporación del patrón definido entre el tiempo de evaporación del solvente en cuestión.

$$\text{Razón de evaporación } X = \frac{\text{Tiempo de evaporación } AB}{\text{Tiempo de evaporación } X}$$

- ✓ Punto de ebullición y zona de ebullición: es la temperatura en la cual, el líquido cambia a fase vapor sin sufrir cambios en su estructura. Usamos el término zona de ebullición debido a que por lo general los disolventes no son sustancias químicamente puras. Los disolventes se clasifican en las siguientes zonas de ebullición:

**Tabla 1.4. Zonas de ebullición de solventes**

Zona	Rango de temperatura [°C]
Punto de ebullición bajo	100
Punto de ebullición medio	100 -150
Punto de ebullición alto	151 - 250

*Fuente: (Doerner M. , 2005)*

Los disolventes que hierven por encima de los 250 °C , ya no son considerados disolventes sino más bien actúan como agentes ablandadores, quedando retenidos casi por completo en la película.

- ✓ Punto de inflamación: la mayoría de los disolventes son combustibles y el riesgo de incendio está relacionado con su punto de inflamación, que es la temperatura a la cual producen vapores inflamables.
- ✓ Efectos fisiológicos: algunos disolventes pueden extraer grasas de la piel humana, cuya función es humectarla, dejándola áspera y arrugada (Doerner M. , 2005)

Los alcoholes que se utilizan como solventes se caracterizan por tener bajo peso molecular, estos actúan como agentes específicos para disolver varios tipos de resinas y polímeros específicos. Los que presentan valores más altos de toxicidad e irritabilidad son los que tienen enlaces dobles o triples, tales como el alcohol alílico, alcohol amílico, 2- butanol, 1-butanol, alcohol isopropílico y alcohol metílico o metanol. (Carrasco, 2000)

El alcohol isopropílico e isobutílico son los más usados, el isopropílico se emplea en formulaciones con base nitrocelulosa y resinas especiales, y el isobutílico actúa como agente para disminuir la viscosidad al aplicar pocas cantidades de disolvente.

Para usar un disolvente en la preparación de pinturas es importante tener en cuenta dos aspectos importantes: la proporción de solvente verdadero y co-solvente, debe ser de tal manera que la solución ligante sea perfecta y que en el transcurso del proceso de evaporación la mezcla esté en equilibrio, es decir el ligante no se puede insolubilizar, esto ocurre cuando el disolvente se evapora más rápido que el co-solvente.

Nunca se deben usar disolventes que tengan el grupo OH en su composición, como los alcoholes, en recubrimientos con poliuretano ya que reaccionan con los isocianatos. (Carbonell, 2009)

#### 1.1.4.2. Aceite de fusel como bioaditivo.

Los aditivos que tienen oxígeno mejoran el octanaje de los combustibles y reducen las emisiones de monóxido de carbono en los gases de escape, pero también pueden tener otras repercusiones como es el caso de los alcoholes que aumentan la volatilidad y afectan los materiales de los equipos de inyección, por ejemplo hinchamiento de los elastómeros y corrosión.

Los alcoholes se usan como fuente de combustible en otros países que no tienen abastecimiento de petróleo pero poseen abundante materia vegetal, los 4 alcoholes de mayor uso son: alcohol metílico, alcohol etílico, propílico y butílico, que se caracterizan por sus excelentes propiedades antidetonantes y caloríficas, siendo su número de octano aproximadamente 100. (Severns, 2007)

El aceite de fusel está compuesto principalmente por alcohol isoamílico, el cual tiene un alto poder calorífico correspondiente a 34,49 MJ/Kg (Quintana, 2011)

Entre las principales aplicaciones del aceite de fusel, tenemos su uso como bioaditivo. Para ello existen factores que influyen en la combustión directa de estos alcoholes, como son:

✓ Contenido de agua

La presencia de agua en las mezclas de compuestos oxigenados con gasolina, puede acarrear los siguientes efectos en los motores:

a) Corrosión de los componentes metálicos del sistema de inyección.

b) Alteración en el funcionamiento de los motores debido a la separación de la mezcla como por ejemplo etanol- agua-gasolina.

(Rondón & Mantilla, 2015)

✓ Número de octano

El RON cuantifica la capacidad antidetonante de los combustibles en motores de encendido, es un indicador de la calidad de la gasolina, ya que a un mayor número de octano, la gasolina resistirá un mayor grado de detonación, por ende ayuda en la eficiencia del motor.

- ✓ Presión de vapor Reid  
La presión de vapor Reid es un indicador de la volatilidad de la gasolina y está relacionado con la tasa de evaporación, es decir a mayor presión de vapor, la gasolina se evapora más rápido.
  
- ✓ Curva de destilación  
El aceite de fusel al igual que la gasolina es una mezcla de varios compuestos, en el caso de la gasolina, hidrocarburos con diferentes puntos de ebullición. La curva de destilación indica el porcentaje de muestra evaporado en un intervalo de temperatura a condiciones estandarizadas. (Dabbagh, Ghobadi, Ehsani, & Moradmand, 2013)
  
- ✓ Solubilidad  
Al mezclar alcoholes con gasolina, surge un problema de solubilidad, lo que limita la cantidad de alcohol a usar, por ejemplo, cuando se añade metanol o etanol al tanque de gasolina una cantidad mayor al 5 % y 10%, respectivamente, el agua se separa de la mezcla. (Dietsche, 2003)

## **1.2. Tratamiento del aceite de fusel**

A nivel internacional, países como Colombia y Brasil, han realizado múltiples investigaciones para la obtención del aceite de fusel refinado, especialmente para recuperar los alcoholes iso-amílicos, que tienen mayor valor comercial.

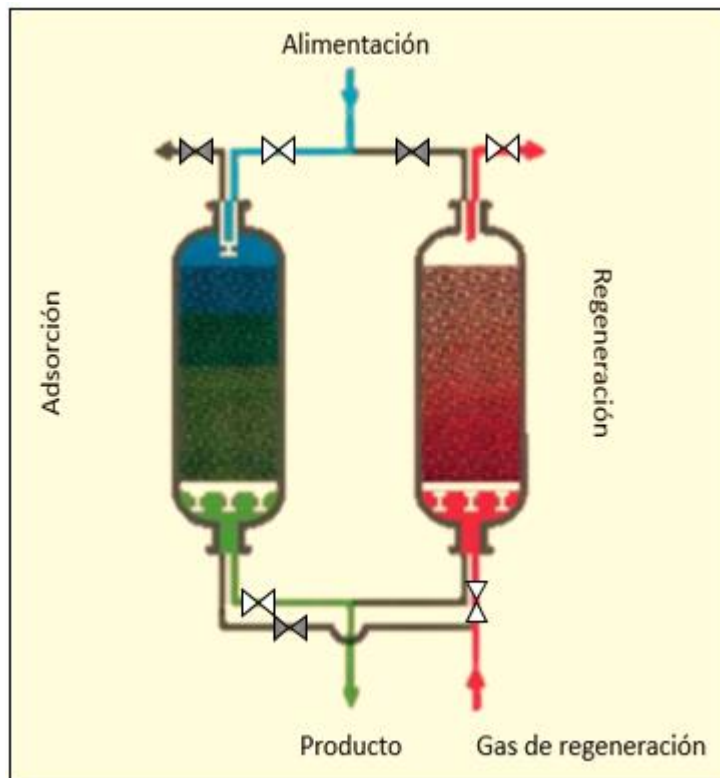
Los tratamientos para deshidratar alcoholes empleados en la industria son: adsorción con tamices moleculares, pervaporación, destilación al vacío y extracción salina.

### **1.2.1. Adsorción**

La adsorción es una operación unitaria entre dos fases donde uno o más componentes de un fluido son adsorbidos por un sólido. Esto es causado principalmente por la fuerza de van der Waals y la fuerza

electrostática entre moléculas del adsorbato y los átomos que componen la superficie del adsorbente. Por lo tanto, los adsorbentes se caracterizan por las propiedades superficiales tales como: el área superficial y la polaridad. (Suzuki, 1990)

Una vez que el adsorbente se satura, no puede adsorber más y por lo tanto, se procede a un proceso de desorción o regeneración para usarlo otra vez.



**Figura 1.3. Sistema de adsorción típico de dos lechos**

*Fuente: (Grace Davison, 2010)*

En la Figura 1.3 se observa un sistema de adsorción típico, dónde la alimentación entra por la parte superior de uno de los lechos, y permanece por un tiempo de residencia establecido hasta alcanzar el equilibrio entre fases, luego el fluido tratado, es retirado por la parte inferior del lecho. Mientras ocurre la adsorción, el segundo lecho está siendo regenerado a contracorriente.



Los materiales adsorbentes más comunes son: carbón activado, alúmina activa, zeolitas, sílica gel.

✓ Carbón activado

El carbón activado es ligeramente polar debido a los óxidos que presenta, pero mucho menos polar que otros adsorbentes. Generalmente contiene cenizas, que pueden influir en las reacciones entre las moléculas adsorbidas, por lo que es necesario investigar los efectos catalíticos antes de seleccionar este adsorbente para un proceso. (Alameda, 2015)

✓ Alúmina activa

Son óxidos de aluminio porosos con grandes áreas superficiales. La alúmina no es tóxica y puede adsorber líquidos, vapores y gases sin cambiar de forma o propiedades, sin hincharse ni desintegrarse. También tienen una alta resistencia a golpes y abrasión. La alúmina activada se usa a menudo para neutralizar ácidos y adsorber la humedad de transformadores y aceite lubricante para prevenir el deterioro del aceite y la formación de lodos. (Alameda, 2015)

✓ Zeolitas sintéticas

Las zeolitas son materiales cristalinos, altamente porosos, pertenecen a la clase de aluminosilicatos. Su estructura está formada por tetraedros de  $\text{AlO}_4$  o  $\text{SiO}_4$ . Estos tetraedros son los bloques de construcción básicos para diversas estructuras de zeolita, tales como zeolitas A y X (ver Figura 1.4). (UOP LLC, 2009)



**Figura 1.4. Estructura de las zeolitas**

*Fuente: (Grace Davison, 2010)*

Las zeolitas tienen una carga negativa que dan como resultado un campo electrostático fuerte en la superficie interna, debido a la presencia de la alúmina. Las zeolitas tienen una mejor capacidad de adsorción a altas temperaturas (>150 °C)

✓ Sílica gel

La sílica gel es un material adsorbente de forma porosa amorfa de  $\text{SiO}_2$ . Aunque tiene la misma composición química de la arena, la sílica gel es muy diferente a otros materiales basados en  $\text{SiO}_2$ , debido a su estructura interna única. Se compone de un gran red de poros microscópicos. Este material tiene una amplia gama de diámetros, típicamente entre 5A y 300 A. (UOP LLC, 2009)

Algunos agentes tienen un indicador de cloruro de cobalto que es azul cuando la muestra está seca y vira a rosa pálido cuando la muestra está húmeda, este indicador permite seguir fácilmente el grado de adsorción del agua. La sílica gel se activa calentando a una temperatura entre 100-105°C durante 24 horas. (Gibaja, 1998)

La Tabla 1.5 muestra una comparación de las propiedades más importantes de las zeolitas y la sílica gel, materiales a usar en la presente investigación:

**Tabla 1.5. Comparación de las propiedades entre zeolitas y sílica gel**

Propiedades	Zeolitas	Sílica Gel
<b>Composición química</b>	$Me^+_x[(AlO_2^-)_x(SiO_2)]_y \cdot nH_2O$ donde Me pueden ser cationes como Na, K, Ca o Li	SiO <sub>2</sub> químicamente inerte, no metales o cationes presentes
<b>Estabilidad química</b>	En ambientes básicos y neutros	En ambientes ácidos y neutros
<b>Tamaño del poro</b>	Zeolita A: ~3Å, 4Å, 5Å Zeolita X: 8Å	Rango de tamaño del poro entre 5Å -300Å Promedio tamaño de poro pequeño: 20 Å Promedio tamaño de poro amplio: 110 Å
<b>Área superficial</b>	800 m <sup>2</sup> /g	Poros pequeños: 800 m <sup>2</sup> /g Poros amplios: 400 m <sup>2</sup> /g
<b>Volumen poroso efectivo</b>	0.25 – 0.3 cm <sup>3</sup> /g	Poros pequeños: 0.4 cm <sup>3</sup> /g Poros amplios: 1.2 cm <sup>3</sup> /g
<b>Conductividad térmica</b>	0.12 W/m-K o 0.07 BTU/ft-°F	0.14 – 0.2 W/m-K 0.08 – 1.2 BTU/ft-°F
<b>Calor de adsorción del agua</b>	4187 kJ/kg H <sub>2</sub> O 1800 BTU/lb H <sub>2</sub> O	2512 kJ/kg H <sub>2</sub> O 1080 BTU/lb H <sub>2</sub> O
<b>Capacidad calorífica</b>	0.96 kJ/K-kg 0.23 BTU/°F-lb	0.92 kJ/K-kg 0.22 BTU/°F-lb

Fuente: (Grace Davison, 2010)

### 1.2.2. Pervaporación

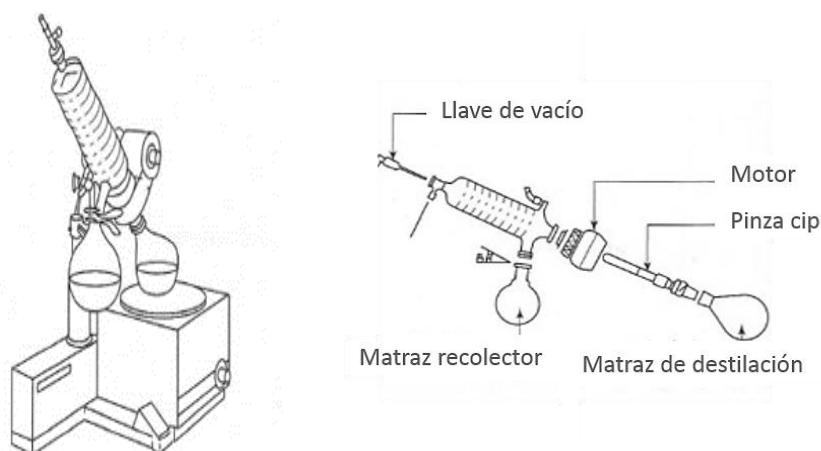
La pervaporación es un proceso de separación por membranas, en la cual una mezcla líquida binaria o multicomponente puede ser separada por vaporización parcial a través de una membrana densa. Durante la pervaporación, la corriente de alimentación está en contacto directo con un lado de la membrana, mientras el permeado es removido en fase vapor desde el lado opuesto a vacío o por arrastre con gas y luego es condensado. (Neel, 1991)

La pervaporación puede ser usado para la deshidratación de solventes orgánicos, separación de mezclas binarias de componentes orgánicos, recuperación de compuestos aromáticos en la industria alimenticia y cosmética; también puede ser aplicada como una técnica alternativa para la deshidratación del aceite de fusel. (Kujawski & Capala, 2001)

### 1.2.3. Rotoevaporador

El funcionamiento de un rotoevaporador es semejante a una destilación al vacío, pero un sistema más mecanizado. Mediante el sistema de vacío reduce la presión y en consecuencia el punto de ebullición del solvente que se quiere evaporar; de esta manera el solvente puede ser removido sin que sea necesario aplicar demasiado calor al sistema. Además, como hay rotación, el líquido se apoya en las paredes, con lo cual, se incrementa la superficie del líquido expuesta a la evaporación, disminuyendo el tiempo empleado. (Instrumental Pasteur , 2017)

En la Figura 1.5 se muestran las partes que componen un rotoevaporador. El matraz de destilación se conecta al tubo evaporador por donde pasan los vapores hacia el interior de un refrigerante tipo serpentín, luego que el disolvente se ha condensando se recoge en el matraz colector. La rotación de la muestra evita que el disolvente salte violentamente mientras se aplica vacío.

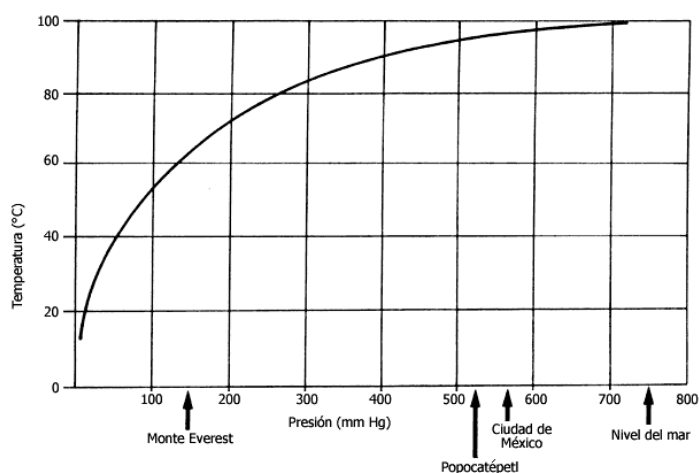


**Figura 1.5. Componentes de un rotoevaporador**

Fuente: [www.eplantscience.com](http://www.eplantscience.com)

Es importante conocer el punto de ebullición del disolvente que se va a eliminar para no sobrecalentar la muestra o para evitar evaporarlo junto con los otros componentes. (Repositorio Universidad de Sevilla, 2017)

El aceite de fusel tiene un alto punto de ebullición entre 130 y 132 ° C. (Patil, Butala, & Koolwal, 2002). Como el disolvente a eliminar es el agua, se buscan las condiciones ideales (temperatura y presión) para evaporar el agua sin sobrecalentar la muestra. En la Figura 1.6 se puede ver que a 150 mm Hg de presión, corresponde una temperatura de 60 °C aproximadamente.



**Figura 1.6. Puntos de ebullición del agua a diferentes presiones**

*Fuente: Biblioteca Digital ILC, 2010*

En la rotaevaporación no sólo se va a evaporar agua, sino otros compuestos presentes en los intervalos de temperaturas, debido a que en el destilado la mayor temperatura alcanzada es de 100 °C a presión atmosférica, quedando el alcohol isoamílico en el residuo de la destilación junto a otros alcoholes.

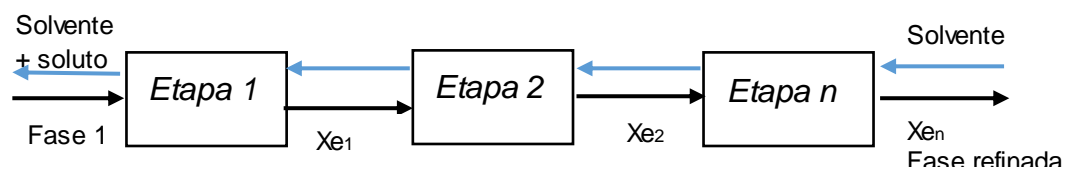
En este método se obtienen tres fases, dos fases iniciales que se recogen en el destilado y la tercera fase que es el residuo que queda en el matraz de destilación. Con base a los puntos de ebullición de los compuestos presentes en el aceite de fusel analizados, se puede decir teóricamente, que en la primera fase se encuentran alcoholes (C<sub>1</sub>-C<sub>3</sub>) tales como etanol, metanol, n-propanol. De igual manera en la segunda fase la composición va a ser parecida pero con menor contenido de

agua. El residuo que está en el balón de destilación va a estar libre de agua.

#### 1.2.4. Extracción líquido – líquido

La operación unitaria de extracción líquido-líquido es usada para separar compuestos de una fase líquida homogénea; esto involucra, la adición de un solvente líquido, el cual es total o parcialmente inmisible con la primera fase. Para que se lleve a cabo la separación, debe existir un gradiente de concentración en los componentes claves, y cuando alcance el equilibrio, el potencial químico de cada componente es el mismo en cada fase.

Esta operación puede llevarse a cabo en una o más etapas, esto va a depender de la concentración a la que se quiere llevar el soluto. La Figura 1.7 muestra un sistema típico de la extracción líquido – líquido.



**Figura 1.7. Sistema de extracción líquido – líquido de n etapas a contracorriente**

#### ✓ Salmuera

La salmuera es agua que tiene una elevada concentración de cloruro de sodio disuelta. Se lo usa a nivel industrial para deshidratar productos alimenticios o en la transferencia de calor para mantener temperaturas bajas. (EcuRed, 2017)

El isobutil carbinol que es el principal constituyente de la fermentación del alcohol amílico, por ende, también del aceite de fusel, se puede extraer al mezclarlo con una solución saturada de cloruro de sodio, de manera que al separar la capa oleosa de la capa de salmuera, se procede a destilarla y se recoge la parte que ebulle

en un intervalo de temperatura entre 125 y 140 °C. (Encyclopædia Britannica, 1911)

### 1.2.5. Tratamiento con sales desecantes

Los agentes absorbentes comúnmente usados son: sulfato de magnesio, sulfato de sodio anhidro, cloruro de calcio anhidro.

✓ Sulfato de magnesio

Es un desecante económico, neutro, bastante rápido y eficaz en la absorción de agua. Se lo puede utilizar para secar casi todos los solventes, incluso ésteres, cetonas, ácidos grasos, nitrilos, amidas, etc. Se activa calentando a 250°C por 6 horas. (Gibaja, 1998)

✓ Sulfato de sodio anhidro

Es un desecante económico, neutro, lento pero con gran capacidad de absorción de agua, por sus propiedades casi inertes se lo usa con casi todos los solventes, a excepción del benceno y el tolueno, ya que no actúa. Es efectivo usando compuestos fácilmente descomponibles como ácidos grasos, aldehídos, cetonas, halogenuros de alquilo. Trabaja como agente desecante a temperaturas inferiores a 32.4 °C. (Repositorio Universidad de Sevilla, 2017) Por encima de los 30°C el heptahidrato se rompe y su capacidad de absorción se reduce a la mitad.

Dentro de las ventajas de usar este compuesto, tenemos que se puede decantar y no hace falta filtrar, además que es fácil saber la cantidad a añadir, debido a su tendencia a aglomerarse en el fondo cuando hay un exceso de agua).

✓ Cloruro de calcio anhidro

Es barato y rápido, pero no completamente eficiente. Se usa para secar hidrocarburos, halogenuros de alquilo y éteres. Reacciona con alcoholes, aminas, algunos ésteres, amidas, cetonas y compuestos

que contienen carbonilos, propiedad que es utilizada para eliminar trazas de alcohol de un disolvente. Contiene cal libre, por lo tanto reacciona con ácidos.

No es recomendable usarlo directamente para secar líquidos que tengan grupos funcionales que reaccionen con él. Una de sus principales aplicaciones es ubicarlos en la entrada de reactores o equipos de destilación, en los llamados tubos o trampas de humedad. (Villegas A, 2006)



# **CAPÍTULO 2**

## **METODOLOGÍA**

## 2.1. Diseño experimental

En la Figura 2.1 se resume el diseño experimental del presente trabajo de investigación.

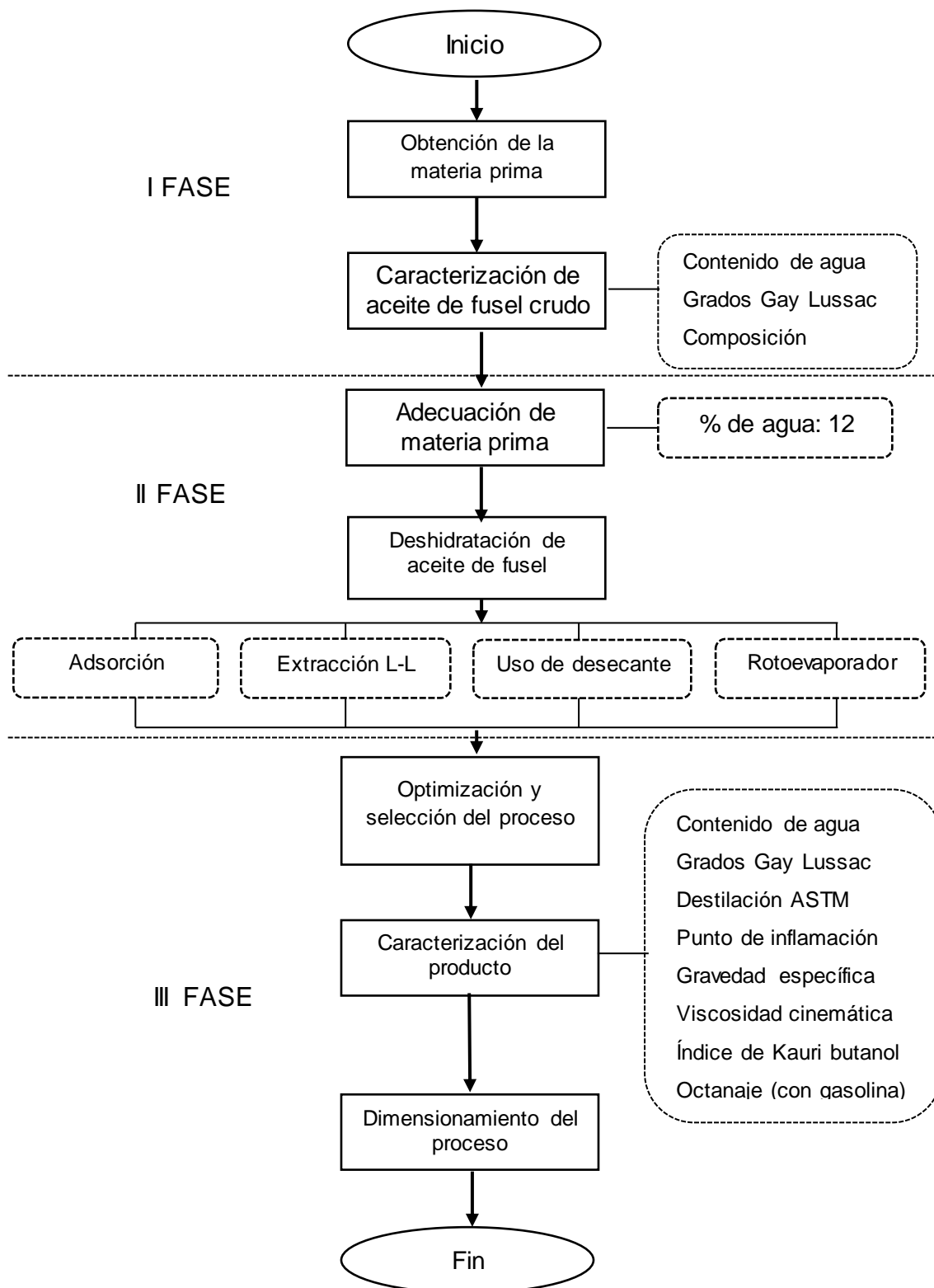


Figura 2.1. Esquema de experimentación

## 2.2. Caracterización del aceite de fusel sin tratamiento (crudo)

Para la realización de la parte experimental a escala de laboratorio, se utilizó como materia prima el aceite de fusel proveniente de las tres destilerías nacionales con mayor producción de etanol anhidro, las cuales fueron identificadas como: Muestra 1, Muestra 2 y Muestra 3, que corresponden a Producargo, Codana y Soderal respectivamente. (Ver Figura 2.2.)

Esto se hizo principalmente con la finalidad de contrastar el contenido de agua de todas las muestras y en caso de encontrar una gran diferencia entre ellas, realizar un tratamiento previo, para así poder tratar a las tres muestras en conjunto.

Las pruebas que se realizaron para obtener la caracterización del aceite de fusel crudo fueron las siguientes:

- ✓ Grados Gay Lussac
- ✓ Cromatografía de gases
- ✓ Contenido de agua



Figura 2.2. Muestras de aceite de fusel

### 2.2.1. Grados Gay Lussac

La determinación del grado alcohólico se realizó con el densímetro digital DMA 48 (Ver Figura 2.3). Para ello, se colocó 1 ml de muestra en un matraz de 50 ml que está conectado al equipo con una manguera y se da inicio a la medición.



**Figura 2.3. Densímetro digital DMA 48**

### **2.1.2. Cromatografía de gases**

La determinación de la composición de los aceites de fusel se realizó mediante un cromatógrafo de gases (Ver Figura 2.4) con detector de ionización de llama (FID), junto a una columna empacada con el de 5% de Carbowax 20 M y un patrón interno de n-butanol. El equipo identifica los siguientes compuestos: acetaldehído, acetato de etilo, metanol, propanol, isobutanol, alcoholes amílicos y furfural.



**Figura 2.4. Equipo para cromatografía de gases HP 5890**

Para realizar las mediciones se procedió a diluir el analito hasta alcanzar un grado alcohólico de 40, luego se inyectó  $1 \text{ mm}^3$  de la muestra a analizar. El tiempo de análisis fue de 20 minutos por cada muestra.

### 2.3.3. Contenido de agua

Esta metodología basada en la normativa ASTM D 1796 permite determinar el contenido de agua y sedimentos por centrifugación.

#### Materiales y equipos:

- ✓ Centrifuga universal (ver Figura 2.5)
- ✓ Tubos de centrifuga de 100 ml
- ✓ 2 Probetas de 100 ml



Figura 2.5. Centrifuga universal

#### Reactivos:

- ✓ Tolueno
- ✓ Aceite de fusel

#### Procedimiento:

- ✓ Colocar en cada tubo de centrifuga 50 ml de tolueno y 50 ml de aceite de fusel.
- ✓ Ubicar los tubos en la centrifuga frente a frente.
- ✓ Ajustar la velocidad de rotación a 1300 rpm durante 15 minutos aproximadamente.
- ✓ Luego del tiempo establecido, detener la centrifuga y leer los ml.  
Expresar en porcentaje:

$$\% \text{ Agua} = \frac{\text{ml agua}}{100 \text{ ml}} * 100$$

### 2.3. Tratamiento de deshidratación

Los métodos empleados para remover el contenido fueron los siguientes: rotoevaporador, adsorción con zeolitas y sílica gel, extracción líquido-líquido y tratamiento con sulfato de sodio. Cada método fue evaluado en las mismas condiciones por separado para determinar el de mayor eficiencia.

La Tabla 2.1 muestra la cantidad de agente adsorbente añadido por cada 50 ml de aceite de fusel a tratar.

**Tabla 2.1. Relación aceite de fusel/ agente adsorbente**

Adsorbente	Relación 2/1	Relación 1/1	Relación 1/2
<b>Zeolita</b>	20,34 g de zeolita	40,68 g de zeolita	81,36 g de zeolita
<b>Sílica gel</b>	20,34 g de sílica gel	40,68 g de sílica gel	81,36 g de sílica gel
<b>Solución salmuera saturada</b>	25,00 ml de solución	50,00 ml de solución	100,00 ml de solución
<b>Sulfato de sodio</b>	3,75 g de sulfato de sodio	7,50 g de sulfato de sodio	15,00 g de sulfato de sodio

#### 2.3.1. Rotoevaporador

Uno de los métodos empleados para eliminar el agua del aceite de fusel es la extracción al vacío mediante un rotoevaporador (ver Figura 2.6), muy utilizado en los laboratorios de orgánica para eliminar un disolvente.



**Figura 2.6. Equipo rotoevaporador**

Esta prueba fue evaluada de manera preliminar, debido a que no se necesita ningún agente adsorbente para remover el agua.

**Materiales y equipos:**

- ✓ Rotoevaporador
- ✓ Probeta

**Reactivos:**

- ✓ Aceite de fusel

**Procedimiento:**

En la destilación realizada al aceite de fusel, las condiciones de operación se establecieron basándose en el punto de ebullición del agua a diferentes presiones, a 100 mm Hg corresponde una temperatura de 50 °C, separándose así el agua y los alcoholes presentes en ese rango de temperatura de ebullición, como son el metanol, isopropanol y propanol que ebulen a menos de 100°C.

Al iniciar el procedimiento, se obtuvo un condensado que se recogió instantáneamente, en esta fase se acumula la mayor cantidad de agua, luego en otro matraz colocamos lo que se destile hasta que la velocidad de recolección disminuyó notablemente, que llamamos fase 2. Finalmente el residuo que quedó en el balón de destilación es motivo de nuestro interés, puesto que se espera que esta fase se encuentre libre de agua.

## **2.3.2. Adsorción**

### **2.3.2.1. Adsorción mediante zeolita**

Se escogió el tipo de zeolita en función del diámetro de los poros, sabiendo que el tamaño de la molécula de agua es  $0,25 \times 10^{-9}$  m, se usó zeolita sintética 3 A, ya que este material es capaz de retener en su superficie, moléculas que tengan un tamaño de hasta  $0,32 \times 10^{-9}$  m. Para lograr la adsorción, es necesario llevar el aceite de fusel a

fase vapor, ya que la capacidad de adsorción de las zeolitas es mayor al trabajar en esa fase.

**Materiales y equipos:**

- ✓ Matraz de destilación 150 ml
- ✓ Condensador recto
- ✓ Mangueras
- ✓ Tapones
- ✓ 3 Soportes Universales
- ✓ 3 Agarraderas
- ✓ Malla de amianto
- ✓ 1 Probeta de 50 ml
- ✓ Malla de nylon
- ✓ Estufa

**Reactivos:**

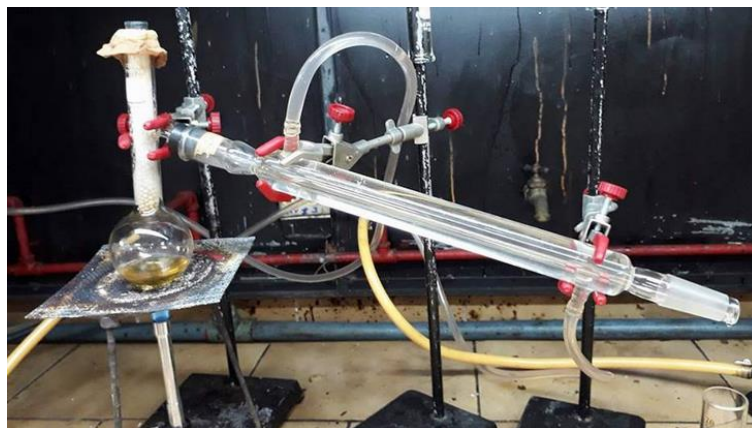
- ✓ Zeolita sintética 3A
- ✓ Aceite de fusel

**Procedimiento:**

Se colocó 50 ml aceite de fusel en el matraz de destilación, se preparó un lecho de zeolita usando una media nylon, la cual se ubicó en el cuello del matraz; se conecta el matraz al condensador, como un sistema de destilación simple. (Ver Figura 2.7). Una vez armado el sistema se procedió a calentar el aceite de fusel, hasta una temperatura de 135 °C, la cual es la temperatura a la que el fusel empieza a craquear. Se recoge el destilado en una probeta.

La zeolita usada fue regenerada en una estufa a 180°C, según especificaciones técnicas del proveedor, la cantidad de zeolita empleada en cada corrida varía de acuerdo a la Tabla 2.1.





**Figura 2.7. Sistema de adsorción zeolita – aceite de fusel**

### **2.3.2.2. Adsorción mediante sílica gel**

Se empleó sílica gel industrial, la experimentación se realizó a 25°C. El tiempo de retención del aceite de fusel varía de acuerdo a la relación aceite de fusel/agente adsorbente, y fue determinado por el cambio de color del indicador (azul a rosa claro). Los tiempos de retención fueron: 12, 20 y 26 minutos para las relaciones aceite de fusel/sílica gel de 1/2, 1/1 y 2/1 respectivamente.

#### **Materiales y equipos:**

- ✓ Vaso de precipitación
- ✓ Probeta
- ✓ Agitador
- ✓ Balanza analítica
- ✓ Estufa
- ✓ Papel filtro
- ✓ Embudo

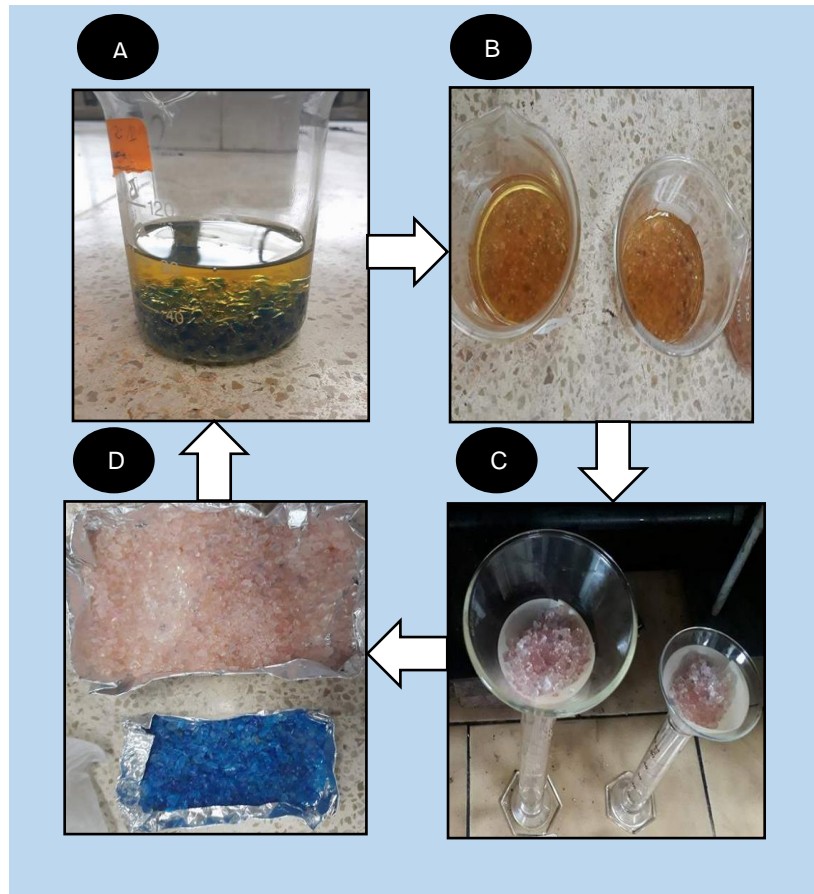
#### **Reactivos:**

- ✓ Sílica gel
- ✓ Aceite de fusel

#### **Procedimiento:**

Se colocaron en el vaso de precipitación 50 ml de aceite de fusel y varias cantidades de sílica gel según la relación descrita en la Tabla

2.1; se agitó el contenido del vaso de precipitación y se tomó el tiempo del viraje del agente adsorbente. Una vez que la sílica, se tornó totalmente rosa claro, se procedió a filtrar para poder regenerarla a 105°C en la estufa. El material regenerado es usado nuevamente en las experimentaciones.



**Figura 2.8. Ciclo del sistema de adsorción: aceite de fusel – sílica gel**

En la Figura 2.8 se observa el ciclo del sistema desde la adsorción hasta la regeneración de la sílica gel.

### 2.3.3. Extracción líquido – líquido

#### **Materiales y equipos:**

- ✓ Vaso de precipitación
- ✓ Probeta
- ✓ Balanza analítica
- ✓ Decantador

**Reactivos:**

- ✓ Solución saturada de salmuera (37 % m/v)
- ✓ Aceite de fusel

**Procedimiento:**

Al agregar la solución saturada al aceite de fusel, se vuelve una mezcla inmiscible (agua-aceite), por lo que el aceite de fusel flota en la parte superior. Se recogió la salmuera con el agua desprendida en la parte inferior del decantador. (Ver Figura 2.9)

Al disminuir el contenido de agua, aumenta del grado alcohólico, lo cual es importante, porque se origina una buena separación de los componentes de la mezcla, facilitando la extracción de ácidos grasos que afectan negativamente a los productos con valor agregado del aceite de fusel.



**Figura 2.9. Separación de fases aceite de fusel- salmuera**

#### 2.3.4. Tratamiento con sulfato de sodio

##### Materiales y equipos:

- ✓ Vaso de precipitación
- ✓ Balanza analítica
- ✓ Papel filtro
- ✓ Embudo
- ✓ Probeta

##### Reactivos:

- ✓ Sulfato de sodio anhidro
- ✓ Aceite de fusel

##### Procedimiento:

Se agregaron las cantidades de sulfato de sodio descritas en la Tabla 2.1. Se agita el contenido del vaso hasta observar que la sal se ha aglomerado en el fondo, (ver Figura 2.10) es importante mantener en agitación el vaso para evitar que la sal forme cristales y dificulte la recuperación de la misma, luego, se filtra el aceite de fusel. La sal aglomerada se recupera a 240 °C.

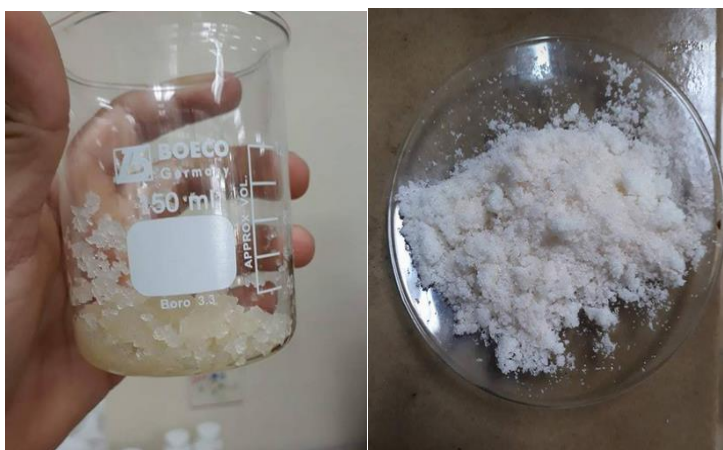


Figura 2.10. Sal hidratada (izquierda), sal recuperada (derecha)

#### 2.3.5. Procesos combinados

En caso de que no se cumplan los objetivos planteados al aplicar cada tratamiento, el siguiente paso es combinar los métodos hasta disminuir

el contenido de agua dentro de lo establecido. El primer paso es seleccionar los métodos que removieron el mayor contenido de agua e identificar las variables tales como concentración, temperatura y tiempo de contacto, que se deben considerar para hacer más eficiente el proceso.

Si no se logra estar dentro de los parámetros establecidos, luego de analizar dichas variables, el siguiente paso es combinar los métodos entre sí, con base a estudios previos y a un análisis técnico – económico adecuado.

## **2.4. Caracterización del aceite de fusel refinado**

El aceite de fusel refinado al igual que al aceite de fusel crudo, se le realizaron pruebas de caracterización: contenido de agua, presión de vapor Reid, destilación ASTM, viscosidad, gravedad específica, punto de inflamación.

La metodología empleada de contenido de agua para la caracterización del aceite de fusel crudo es la misma para caracterizar el aceite de fusel refinado.

### **2.4.1. Presión de vapor Reid**

Basado en la norma INEN 928, la muestra de aceite de fusel se enfrío en un baño de agua que estaba entre 0 a 4°C, luego se esparció en la cámara de muestra y se agitó para saturar con aire, en seguida se coloca el manómetro y se lee la presión a la cual, la pluma del manómetro se estabiliza, si la temperatura difiere de 37.8 °C, la presión debe ser corregida.

### **2.4.2. Destilación ASTM**

Basado en la normativa ASTM D86, la cual consiste en una destilación atmosférica para conocer los rangos de ebullición de un producto. Se colocó hielo y agua en la cámara de condensación, una vez que esté listo, se puso 100 ml de aceite de fusel en un matraz de destilación y

una probeta de 100 ml a la salida del serpentín. Se dio inicio al calentamiento del aceite de fusel y se regula la potencia, de manera que la primera gota caiga en un intervalo de tiempo entre 5 a 10 minutos. Se registraron las temperaturas a la cual cayó la primera gota y luego cada 10 ml de destilado. El sistema se apagó en el momento que se observó la formación de humo dentro del matraz, lo cual indicaba que la muestra estaba craqueando (descomposición de las moléculas). Se apuntó también la cantidad de destilado obtenido, el residuo en el balón y las pérdidas.

#### **2.4.3. Punto de inflamación**

Basado en la norma ASTM D92 Copa abierta Cleveland, para realizar este procedimiento, la copa debe ser previamente limpiada con solvente. Se vertió la muestra en la copa, y se colocó el termómetro de manera que quede suspendido a 6,4 mm del fondo de la copa. Una vez realizado esto, se procedió a calentar la muestra, mientras que una llama se hizo pasar uniformemente, se registró a la temperatura a la cual se observó un fognazo.

#### **2.4.4. Viscosidad cinemática**

Basado en la norma ASTM D-445, en este método se procede a colocar 10 ml de muestra en un viscosímetro, y se coloca en el baño de glicerina a 40 °C. Se toma el tiempo en que el fluido recorre una longitud determinada del instrumento.

Con el Anexo B se escoge la constante de viscosímetros de acuerdo al modelo y se multiplica por el tiempo; si el valor se encuentra dentro del rango del modelo del viscosímetro se acepta este valor, caso contrario, se procede a realizar la prueba con el modelo de viscosímetro que corresponde al rango en el cual está el valor anteriormente calculado.

## **2.5. Uso del aceite de fusel refinado como bioaditivo**

### **Materiales y equipos:**

- ✓ Octanómetro
- ✓ Probeta de 1000 ml

### **Reactivos:**

- ✓ Aceite de fusel
- ✓ Iso-octano
- ✓ n-heptano
- ✓ Gasolina comercial

### **Procedimiento:**

En la medición del octanaje se usó la norma INEN 2102 la cual establece el procedimiento para determinar las características antidetonantes de las gasolinas utilizadas en motores de encendido por chispa. El equipo utilizado fue el octanómetro. Para el ensayo se prepararon mezclas entre 95 ml de gasolina de 85 octanos y 5 ml de aceite de fusel.

## **2.6. Dimensionamiento del sistema de deshidratación**

Una vez se establezca el proceso óptimo para la deshidratación, se realiza el dimensionamiento del sistema, teniendo en cuenta las condiciones de operación con base a los datos obtenidos experimentalmente y la capacidad de la planta, la cual es determinada con la producción anual de las destilerías.

# **CAPÍTULO 3**

## **RESULTADOS**



### 3.1. Caracterización del aceite de fusel crudo

El contenido de agua y los grados GL se presentan en la Tabla 3.1, en dónde se ve, que tanto la muestra 1 como la muestra 2 tienen el porcentaje de agua similar, siendo 12 y 10 % respectivamente, mientras que la muestra 3 presenta un valor del 40%, por ende, esta muestra recibirá un tratamiento previo hasta alcanzar un valor cercano a las dos muestras. De igual manera, se puede decir que el grado alcohólico está relacionado con el contenido de agua, es decir indica la presencia del agua en una muestra.

**Tabla 3.1. Contenido de agua y GL del aceite de fusel crudo**

Muestra	Grados GL	% de agua
1	89	12
2	89	10
3	49	40

*Fuente: Laboratorio de Calidad Soderal S.A., 2017*

La Tabla 3.2 presenta la composición de las muestras de aceite de fusel analizadas en base seca, se puede observar que los alcoholes iso-amílico e iso-butanol, abarcan aproximadamente el 80 % del peso de las mismas.

**Tabla 3.2. Composición (%) del aceite de fusel crudo**

Componente	% Composición		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Acetaldehido	0,004	0,000	0,054
Metanol	0,001	0,002	0,027
Iso-propanol	0,001	0,000	0,007
Propanol	14,390	18,454	16,685
Esteres	0,481	0,089	0,062
Iso-butanol	33,770	31,769	18,404
ISTD	0,374	0,377	0,150
Iso-amílico	49,667	49,140	64,169
Amílico	0,233	0,033	0,088
Furfural	1,079	0,136	0,355
<b>Total</b>	100,000	100,000	100,000

*Fuente: Laboratorio de Calidad Soderal S.A., 2017*

### 3.2. Pre-tratamiento del aceite de fusel con alto contenido de agua (muestra 3)

El aceite de fusel con un contenido de agua del 40% fue tratado con todos los métodos descritos en el capítulo II, con la proporción 1/2 (aceite de fusel/ agente adsorbente), en la Tabla 3.3 se muestran los resultados.

**Tabla 3.3. Resultados del pretratamiento (Muestra 3)**

Método	Relación 1/2	Relación 1/3
Adsorción con zeolitas	40%	40%
Adsorción con sílica gel	40%	40%
Extracción líquido-líquido	40%	38%
Remoción con sulfato de sodio	40%	40%

*Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017*

La Tabla 3.3 la cual se observa que para dicha proporción no se evidenció cambio alguno. Por este motivo se procedió a aumentar la proporción de agente adsorbente a 1/3 (aceite de fusel/ agente adsorbente). También, se

muestra que ningún método logró disminuir el contenido de agua, a excepción de la extracción con salmuera en la relación de 1/3, en donde se logró remover apenas un 2%, motivo por el cual, se concluye que existe una emulsión aceite de fusel-agua.

Luego de experimentar con diferentes relaciones aceite de fusel/salmuera, finalmente se logró reducir el contenido de agua a un 15%, para ello se usaron 1200 ml de salmuera por cada 100 ml de aceite de fusel, es decir una relación 1/12. En la Tabla 3.4 se detallan los resultados obtenidos en cada corrida.

**Tabla 3.4. Contenido de agua (muestra 3)**

<b>Relación aceite de fusel/salmuera</b>	<b>Contenido de agua</b>
Relación 1/3	38 %
Relación ¼	37%
Relación 1/8	25 %
Relación 1/10	20 %
Relación 1/12	15 %

*Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017*

Debido a que el consumo de la solución extractora fue muy elevada se descartó este método.

Se decidió mezclar las muestras de aceite de fusel, en diferentes cantidades. Primero se realizaron los cálculos respectivos y luego se probó experimentalmente. Donde pudimos notar que al realizar estas mezclas, se logra romper la emulsión, separándose así, la fase acuosa de la fase orgánica, para luego por decantación extraer la parte inferior, es decir remover el agua del aceite de fusel. En la Tabla 3.5, se muestran las diferentes proporciones de mezcla entre las 3 muestras de aceite de fusel, con la respectiva concentración final de agua.

**Tabla 3.5. Mezclas entre muestras de aceite de fusel**

Relación	Cantidad muestra 3	Cantidad muestra 1-2	Contenido de agua de la mezcla
1/1	50 ml	50 ml	17,5%
1/1,5	30 ml	55 ml	14,0%
1/2	30 ml	60 ml	12,0%

*Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017*

Como el objetivo era disminuir el contenido de agua de la muestra 3 de un 40% a un 12% (contenido de agua muestra 1 y muestra 2), la relación escogida para la mezcla fue 1/2.

### 3.3. Tratamiento del aceite de fusel

#### 3.3.1. Resultados de experimentación con rotoevaporador

Los resultados de la prueba preliminar del rotoevaporador se muestran en la Tabla 3.6, donde se observa que se hicieron 2 cortes en el ensayo. El porcentaje de agua de la primera fase fue del 20%, mientras que la segunda y tercera fase, fue de 15 y 0% respectivamente.

**Tabla 3.6. Contenido de agua en las fases obtenidas del rotoevaporador**

Fase	Contenido de agua (%)	Porcentaje de pérdidas (%)
Primera	20	80
Segunda	15	85
Tercera	0	3

*Fuente: CIBE, 2017*

Este método fue descartado debido a que se presentaron muchas pérdidas, tanto en la primera como en la segunda se arrastraron los componentes más ligeros del aceite de fusel. Las pérdidas consideradas en la tercera fase se calcularon haciendo un balance general con la entrada aceite de fusel crudo, lo que se destiló en cada etapa y el residuo que quedó en el matraz. En la Figura 3.1 se esquematiza el balance realizado.

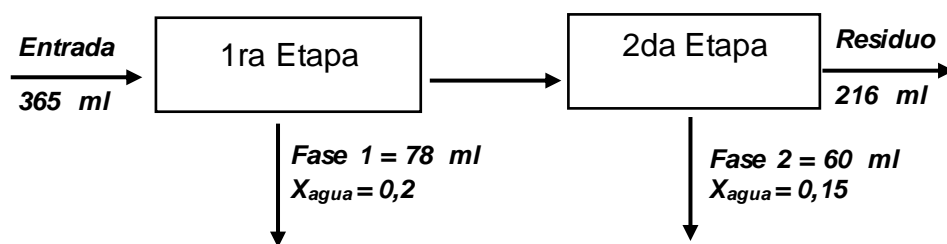


Figura 3.1. Balance en el rotaevaporador

### 3.3.2. Resultados de experimentación de adsorción

#### 3.3.2.1. Zeolita

En el método de adsorción empleando zeolitas se hicieron con 3 relaciones de aceite de fusel/zeolita, siendo estas las siguientes: 2/1, 1/1 y 1/2, y 3 réplicas en cada una. En la Tabla 3.7 se puede observar los resultados de contenido de agua para cada una de las relaciones, con la media, desviación estándar y límites de confianza respectivos.

Tabla 3.7. Porcentaje de agua alcanzado en adsorción con zeolitas

Relación aceite de fusel/zeolita	N	Contenido de agua (%)	Media	Desviación Estándar	Límite de confianza al 95%
2/1	3	6,50	6,40	0,10	[6,10 – 6,70]
		6,30			
		6,40			
1/1	3	4,10	4,03	0,06	[4,21 – 3,85]
		4,00			
		4,00			
½	3	3,25	3,22	0,03	[3,13 – 3,31]
		3,20			
		3,20			

Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017

Para calcular el rendimiento cada relación propuesta, se hizo uso del balance de materia que se muestra a continuación:

$$E = S + P + R$$

$$\text{rendimiento} = \frac{P}{E} * 100\%$$

Siendo E: cantidad de aceite de fusel crudo

S: pérdidas

*P*: aceite de fusel refinado

*R*: residuo en el balón

Para cada 50 ml de aceite de fusel crudo se tiene:

✓ Relación 2/1

$$50 \text{ ml} = S + 22 \text{ ml} + 8 \text{ ml}$$

$$S = 30 \text{ ml}$$

$$\text{rendimiento} = \frac{22 \text{ ml}}{50 \text{ ml}} * 100\% = 44\%$$

✓ Relación 1/1

$$50 \text{ ml} = S + 22 \text{ ml} + 8 \text{ ml}$$

$$S = 20 \text{ ml}$$

$$\text{rendimiento} = \frac{22 \text{ ml}}{50 \text{ ml}} * 100\% = 44\%$$

✓ Relación 1/2

$$50 \text{ ml} = S + 20 \text{ ml} + 8 \text{ ml}$$

$$S = 22 \text{ ml}$$

$$\text{rendimiento} = \frac{20 \text{ ml}}{50 \text{ ml}} * 100\% = 40\%$$

En este método se mantuvieron las siguientes condiciones de trabajo:

Presión de trabajo: 1 atm

Temperatura de trabajo: 140 °C

Tiempo de operación: 11 minutos

El aceite de fusel empieza a craquear a partir de 140°C a la presión atmosférica.

### 3.3.2.2. Sílica gel

En el método de adsorción con sílica gel, se realizaron 3 réplicas para cada relación propuesta, los resultados se muestran en la Tabla 3.8 junto a la media, desviación estándar y límites de confianza respectivos.

**Tabla 3.8. Porcentaje de agua alcanzada en adsorción con sílica gel**

Relación aceite de fusel/sílica gel	N	Contenido de agua (%)	Media	Desviación Estándar	Límite de confianza al 95%
2/1	3	1,60	1,67	0,06	[1,49 – 1,85]
		1,70			
		1,70			
1/1	3	0,80	0,75	0,05	[0,60 – 0,90]
		0,70			
		0,75			
½	3	0,60	0,58	0,03	[0,49 – 0,67]
		0,55			
		0,60			

Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017

Elaborado por: Mero, E; Zambrano, N

En éste método, se efectuó también balance de materia para obtener el rendimiento de cada proporción.

$$E = S + P$$

$$\text{rendimiento} = \frac{P}{E} * 100\%$$

✓ Relación 2/1

$$50 \text{ ml} = S + 40 \text{ ml}$$

$$S = 10 \text{ ml}$$

$$\text{rendimiento} = \frac{40 \text{ ml}}{50 \text{ ml}} * 100\% = 80\%$$

✓ Relación 1/1

$$50 \text{ ml} = S + 40 \text{ ml}$$

$$S = 10 \text{ ml}$$

$$\text{rendimiento} = \frac{40 \text{ ml}}{50 \text{ ml}} * 100\% = 80\%$$

✓ Relación 1/2

$$50 \text{ ml} = S + 41 \text{ ml}$$

$$S = 9 \text{ ml}$$

$$\text{rendimiento} = \frac{41 \text{ ml}}{50 \text{ ml}} * 100\% = 82\%$$

En este método se mantuvieron condiciones normales de trabajo:

Presión de trabajo: 1 atm

Temperatura ambiente: 26 °C – 30 °C

Tiempo de contacto: relación 1/2: 12 minutos

relación 1/1: 20 minutos

relación 2/1: 26 minutos

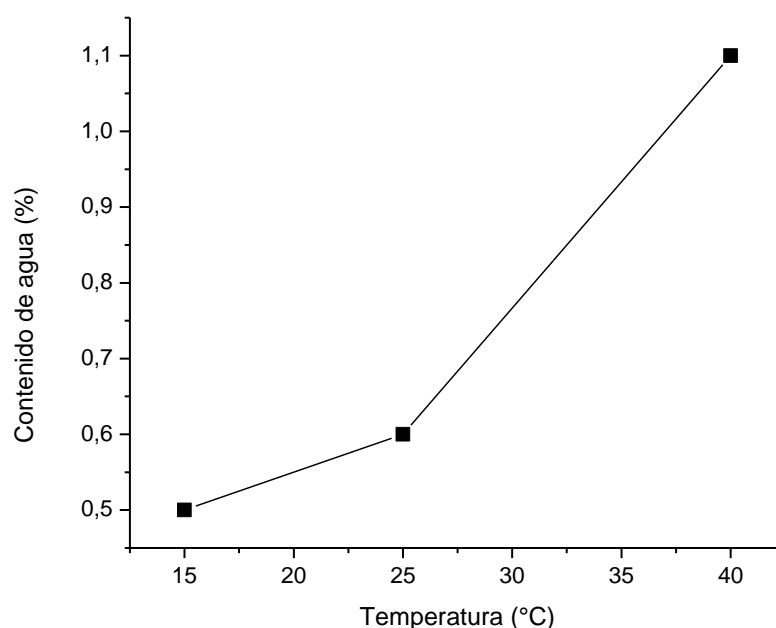
Se trabajó a temperatura ambiente, porque al aumentar  $T$ , la capacidad de adsorción de la sílica gel disminuye; mientras que a una menor temperatura, la viscosidad del aceite de fusel disminuye, lo que dificulta la manipulación en la filtración y aumentan las pérdidas. Esto se refleja en la Gráfica 3.1, mientras que en la Tabla 3.9, se muestra el rendimiento y las pérdidas en cada uno de los ensayos realizados.

**Tabla 3.9. Efectos de la temperatura en la adsorción con sílica gel**

Temperatura (°C)	Rendimiento (%)	Pérdidas (ml)
15	70,00	15,00
25	82,00	9,00
40	86,00	7,00

*Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017*





**Gráfica 3.1. Variación de remoción de contenido de agua en función de la temperatura.**

### 3.3.3. Resultados de experimentación de la extracción líquido-líquido

En la extracción líquido – líquido empleando salmuera como medio extractor, se realizaron 3 réplicas para todas las relaciones, los resultados se muestran en la Tabla 3.10 junto a la media, desviación estándar y límites de confianza respectivos. También se puede observar que la relación 1/2 es la que removi6 un mayor porcentaje de agua.

**Tabla 3.10. Contenido de agua en la extracción líquido - líquido**

Relación aceite de fusel/salmuera	N	Contenido de agua (%)	Media	Desviación Estándar	Límite de confianza al 95%
2/1	3	1,10	1,02	0,08	[0,78 – 1,26]
		0,95			
		1,00			
1/1	3	0,65	0,62	0,03	[0,53 – 0,71]
		0,60			
		0,60			
1/2	3	0,40	0,42	0,03	[0,33 – 0,51]
		0,45			
		0,40			

Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017

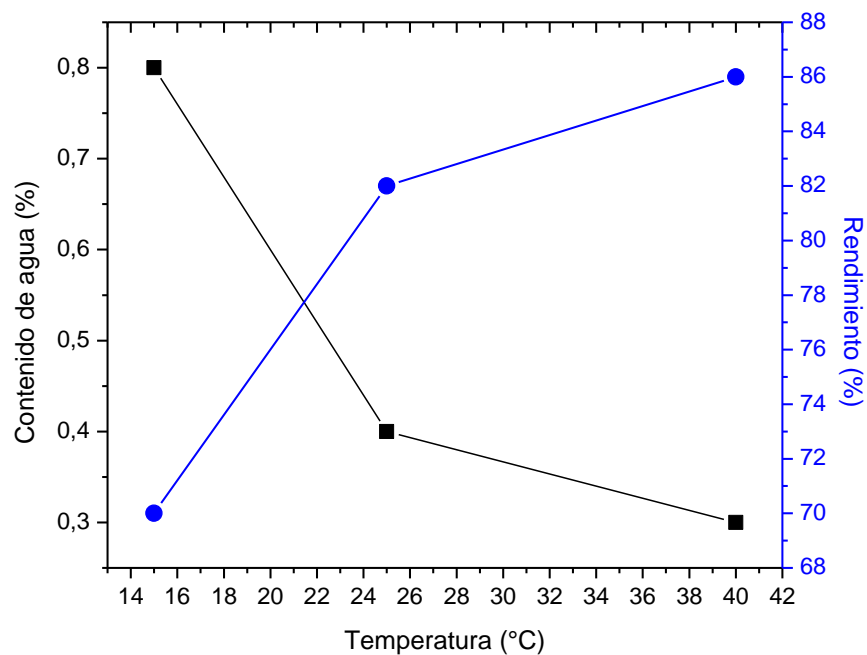
Las condiciones del proceso en la extracción líquido – líquido fueron las siguientes:

Presión de trabajo: 1 atm

Temperatura de trabajo: 26 °C – 30 °C (dependiendo del clima)

Tiempo de contacto: 20 minutos

Sabiendo que la temperatura influye en la solubilidad de las sustancias, se decidió trabajar a diferentes temperaturas con la proporción 1/2 de aceite de fusel/salmuera. Los resultados se muestran en la Gráfica 3.2, en la cual se observa que al aumentar la temperatura, el porcentaje de agua removido será mayor, debido a que la solubilidad del soluto en la solución extractora aumenta.



**Gráfica 3.2. Variación de la remoción del contenido de agua y rendimiento respecto a la temperatura.**

*Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017*

#### **3.3.4. Resultados de experimentación con sulfato de sodio anhidro**

Los resultados para la remoción de agua con sulfato de sodio anhidro se muestran en la Tabla 3.11 con su respectiva media, desviación estándar y límites de confianza al 95%.

**Tabla 3.11. Resultados del contenido de agua al tratar sulfato de sodio**

Relación aceite de fusel/sulfato de sodio	N	Contenido de agua (%)	Media (%)	Desviación Estándar (%)	Límite de confianza al 95 %
2/1	3	2,85	2,82	0,03	[2,73 – 2,91]
		2,80			
		2,80			
1/1	3	2,40	2,37	0,06	[2,19 – 2, 55]
		2,40			
		2,30			
1/2	3	2,00	2,03	0,03	[1,94 – 2,12]
		2,05			
		2,05			

Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017

El rendimiento se basa en la cantidad de aceite de fusel deshidratado obtenido después de la filtración, comparado con el aceite de fusel crudo. Los resultados se muestran en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.12. Rendimiento en la deshidratación con sulfato de sodio**

Relación aceite de fusel/sulfato de sodio	Rendimiento (%)
2/1	76
1/1	80
1/2	80

Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017

Las condiciones de trabajo para este método fueron las siguientes:

Presión de trabajo: 1 atm

Temperatura de trabajo: 26 °C – 30 °C (temperatura ambiente)

Tiempo de contacto: 2/1 1 hora

1/1 50 minutos

1/2 35 minutos

### 3.4. Caracterización del aceite de fusel refinado

El aceite de fusel totalmente refinado, presenta las siguientes características:

**Tabla 3.13. Propiedades del aceite de fusel refinado**

Propiedad	Unidad	Valor	Ensayo
Contenido de agua	%	0,05	ASTM D-95
Destilación:			
10%	°C	102	ASTM D-86
50%	°C	126	ASTM D-86
90%	°C	138	ASTM D-86
Punto final	°C	170	ASTM D-86
Residuo de destilación	%	1	ASTM D-86
Presión de vapor Reid	Kpa	110	ASTM D-323
Viscosidad cinemática	cSt	2,04	ASTM D-445
Punto de inflamación	°C	44	ASTM D-92
Gravedad específica	-	0,829	INEN 2903
Índice de Kauri butanol	-	23	ASTM D-1133
Índice de refracción	-	1,425	ASTM D-1218

*Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL & Laboratorio de Calidad, Refinería La Libertad, 2017*

### 3.5. Prueba del uso del producto como bioaditivo

Las mezclas para cada prueba se realizaron con gasolina Ecopaís, cuyo número de octano fue de 85. Los resultados de medir el octanaje de las mezclas se detallan en la Tabla 3.14, donde se observa que el octanaje incrementa desde un valor de 85 hasta 89,1.

**Tabla 3.14. Resultados del uso como bioaditivo en gasolina del aceite de fusel**

Muestra	Gasolina (ml)	RON inicial	Aceite de fusel (ml)	RON final	Media	Desviación estándar
M1	95,00	85,00	5,00	88,70		
M2	95,00	85,00	5,00	89,50	89,10	0,21
M3	95,00	85,00	5,00	89,20		

*Fuente: Laboratorio de Calidad, Refinería La Libertad, 2017*

Para elevar el octanaje de 1 galón se necesitaría:

$$3785 \text{ cm}^3 \text{ gasolina} * \frac{5 \text{ cm}^3 \text{ fusel refinado}}{95 \text{ cm}^3 \text{ gasolina}} = 199,2 \text{ cm}^3 \text{ fusel refinado}$$

Aproximadamente 200 ml de aceite de fusel refinado.


# **CAPÍTULO 4**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### 4.1. Selección del método

Se evaluaron las ventajas y desventajas de cada método utilizado, las cuales se describen en la Tabla 4.1.

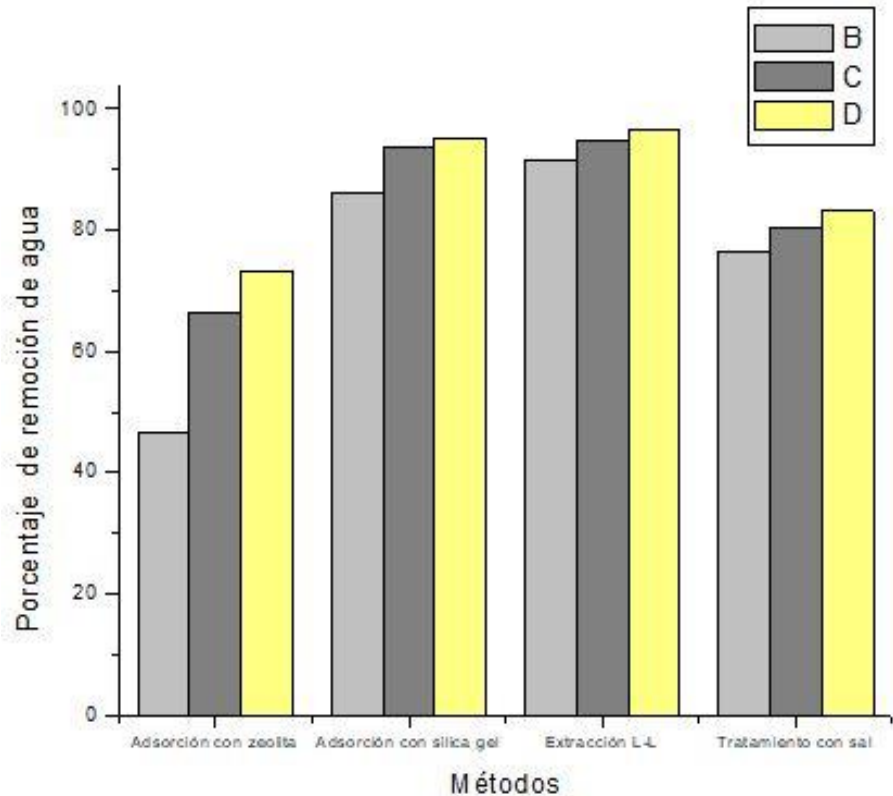
**Tabla 4.1 Ventajas y desventajas de cada método**

<b>Método</b>	<b>Técnico</b> 	<b>Económico</b> 	<b>Ambiental</b> 
Adsorción con zeolita	✓ Proceso a altas temperaturas	✓ Rendimiento bajo	✓ Generación de vapores
	✓ Tiempo de operación corto	✓ Craqueo del aceite de fusel	
Adsorción con sílica gel	✓ Requerimiento calorífico para la regeneración de la sílica gel.	✓ Pérdidas al filtrar	✓ No se generan vapores
			✓ Se recupera la sílica
Extracción líquido - líquido	✓ Fácil separación de la fase refinada.	✓ Reutilización de la solución extractora	✓ No se generan vapores
		✓ Económico	✓ Generación de efluentes a mediano plazo
Tratamiento con sulfato de sodio	✓ Lento	✓ Recomendable para eliminar trazas de agua	✓ No se generan vapores

En la Tabla 4.2 se detalla el porcentaje de rendimiento y en la Figura 4.1 se muestra el porcentaje de remoción de agua de cada método.

**Tabla 4.2. Rendimiento de cada método**

<b>Relación</b>	<b>Adsorción con zeolita (%)</b>	<b>Adsorción con sílica gel (%)</b>	<b>Extracción líquido - líquido (%)</b>	<b>Tratamiento con sulfato de sodio (%)</b>
2/1	44	80	86	76
1/1	44	80	86	80
1/2	40	82	84	80



**Gráfica 4.1. Porcentaje de remoción de agua por cada método**

Los métodos con los cuales se logró remover mayor contenido de agua fueron: la extracción líquido-líquido y la adsorción con sílica gel, llegando a un 0,4% y 0,58% de contenido de agua respectivamente. Estos resultados no cumplieron los objetivos planteados, motivo por el cual se realizaron post-tratamientos.

#### 4.1.1. Métodos combinados

##### 4.1.1.1. Método combinado Extracción L-L

Primero se analizaron los resultados presentados en la Gráfica 4.1; la mejor remoción se logró con la proporción 1/2, pero la relación 1/1 está detrás con un valor cercano, por lo que se procedió a realizar más etapas a ambas proporciones hasta encontrar la condición de equilibrio, que fue en la etapa  $n=2$ . La Tabla 4.3 muestra la concentración de agua en el refinado en cada etapa.



**Tabla 4.3. Concentración de agua en el refinado**

Relación	Extracción L- L	Contenido de agua (%)
1/1	n= 1 etapa	0,62
	n= 2 etapas	0,20
	n= 3 etapas	0,20
1/2	n= 1 etapa	0,40
	n= 2 etapas	0,20
	n= 3 etapas	0,20

*Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017*

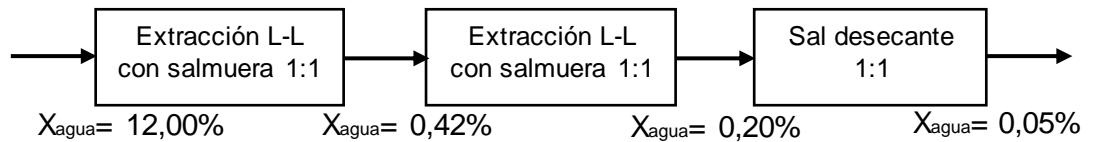
Los resultados al hacer pasar por otra etapa el aceite de fusel en una relación 1/1 son iguales a los resultados de la relación 1/2; teniendo en consideración la cantidad de salmuera a usar en cada proporción, se decidió escoger la relación 1/1.

En este método la salmuera extrae el 98% de agua del aceite de fusel crudo; y, para eliminar las trazas de agua que aún contenía el aceite de fusel se empleó sulfato de sodio. Luego de analizar los resultados obtenidos mostrados en la Tabla 4.4, se determina que la relación óptima a usar es 1/1. En la Figura 4.1 se visualiza de manera clara el proceso completo.

**Tabla 4.4. Porcentaje de agua en el fusel con post-tratamiento**

Relación aceite de fusel/sulfato de sodio	Contenido de agua (%)
2/1	0,08
1/1	0,05
1/2	0,05

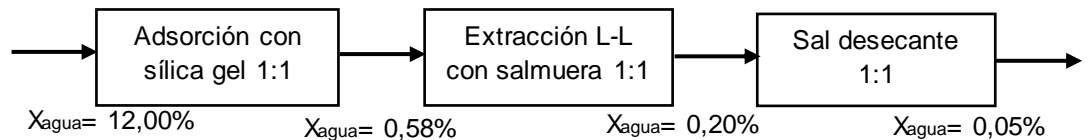
*Fuente: Laboratorio de Hidrocarburos, ESPOL, 2017*



**Figura 4.1 Esquema del Método combinado Extracción L-L**

#### 4.1.1.2. Método combinado sílica gel

En este método la sílica gel elimina el 95% de la cantidad de agua inicial, no se pudo usar como tratamiento posterior el sulfato de sodio (agente desecante) puesto que el producto final no cumplía con las especificaciones planteadas; por ello, se usó un método económico y eficaz, como es la extracción líquido-líquido con salmuera como post tratamiento. En la Figura 4.2 se visualiza de manera clara los procesos aplicados por etapas.



**Figura 4.2. Esquema del Método combinado sílica gel**

Es importante aclarar que se puede omitir la extracción líquido-líquido, añadiendo más cantidad de sulfato de sodio, pero como es un producto de alto costo, decidimos hacer pasar por una etapa previa con salmuera.

#### 4.1.2. Análisis de costos de la materia prima

Se procedió a hacer un análisis de costos con la finalidad de tener una idea o un criterio económico al momento de elegir el método más óptimo. En la Tabla 4.5 se muestran los costos de la materia prima utilizada.

**Tabla 4.5. Costos de la materia prima empleada**

<b>Materia prima</b>	<b>Costo (\$/kg)</b>
Sílica gel	56,00
Costo energético para regenerar 1kg de sílica gel	0,002
Sulfato de sodio	264,00
Sal refinada	0,00964
Agua	0,00055

Para saber cuánto cuesta obtener aceite de fusel deshidratado por ambos métodos, se hace una estimación tomando como base de cálculo 50 ml de alimentación. En la Tabla 4.6 y Tabla 4.7 se detallan las cantidades y costos empleados, incluida la regeneración de los agentes extractores. El tiempo de vida útil de la sílica gel y la salmuera depende del número de veces que se usa, de manera empírica se determinó como 8 y 10 veces respectivamente.

**Tabla 4.6. Costo total para deshidratar aceite de fusel por el método combinado de extracción L-L**

<b>Materia prima</b>	<b>Cantidad (g)</b>	<b>Costo (\$)</b>
Sal refinada	18,35	-
Agua	50,00	-
Regeneración salmuera	2,20	-
Sulfato de sodio	7,50	1,98
<b>Total</b>		1,98

**Tabla 4.7. Costo total para deshidratar aceite de fusel por el método combinado sílica gel**

<b>Materia prima</b>	<b>Cantidad (g)</b>	<b>Costo (\$)</b>
Sílica gel	40,68	2,28
Regeneración sílica gel	-	0,016
Sal refinada	18,35	-
Agua	50	-
Regeneración salmuera	2,20	-
Sulfato de sodio	7,50	1,98
<b>Total</b>		4,39

En la Tabla 4.8 se muestra el costo estimado para producir 1 litro de aceite de fusel deshidratado teniendo en cuenta el precio del aceite de fusel crudo (\$0,05/lit) y que la materia prima usada se puede regenerar.

**Tabla 4.8. Costo total para deshidratar aceite de fusel**

<b>Método</b>	<b>Costo (\$/lt)</b>
Método combinado extracción L-L	4,02
Método combinado sílica gel	8,83

El método más sostenible es la extracción L-L, el costo de la materia prima es la mitad del segundo método analizado, el único problema sería el efluente de salmuera que se genera, para ello, empresas refinadoras de sal tratarían el efluente para recuperar la sal.

#### **4.2. Dimensionamiento del proceso**

La capacidad de la planta se basa en la producción anual de las tres destilerías principales del país, tomando en consideración que se trabajará un turno de 8 horas, de lunes a viernes todo el año, los cuales corresponden a 260 días laborables.

**Tabla 4.9. Producción diaria de aceite de fusel**

<b>Procedencia</b>	<b>L/año</b>	<b>m<sup>3</sup>/día</b>
Producargo	91250	0,4
Codana	219000	0,8
Soderal	54750	0,2
<b>Total</b>	<b>365000</b>	<b>1,4</b>

El rendimiento de la obtención del aceite de fusel refinado es del 86% con base a los resultados experimentales obtenidos.

##### **4.2.1. Tanques de recepción**

Los tanques de recepción serán dos, identificados como TK-001 y TK-002, los cuales tendrán la capacidad de almacenar aceite de fusel durante 10 días.

El TK-001 contendrá la materia prima proveniente de Producargo y Codana, mientras que el TK-002, contendrá el aceite de fusel de Soderal. A continuación en la Tabla 4.10 se muestra la cantidad de aceite de fusel que receptorá cada tanque.

**Tabla 4.10. Volumen contenido en tanques de recepción**

Identificación de tanque	m <sup>3</sup> /día	V materia prima [m <sup>3</sup> ]
TK-001	1,2	11,9
TK-002	0,2	2,1

#### **4.2.2. Pre-mezcla de materia prima**

Este tanque será identificado como V-001, en él se realizará la mezcla entre los aceites de fusel provenientes del TK-001 y TK-002.

El proceso de obtención será por lote, el tiempo de operación para cada lote será de 2 horas, basándose en los resultados experimentales. En cada lote se procesarán 0,35 m<sup>3</sup> de aceite de fusel crudo.

El volumen necesario de cada tanque son los siguientes:

Cantidad de aceite de fusel proveniente de TK-001:	0,24 m <sup>3</sup>
Contenido de aceite de fusel proveniente de TK-002:	0,11 m <sup>3</sup>
Volumen total de aceite de fusel a tratar:	0,35 m <sup>3</sup>
Porcentaje de agua e impurezas:	15,00%

Los residuos de agua e impurezas serán removidos y enviados al TK-004 para su posterior tratamiento.

#### **4.2.3. Preparación de salmuera**

En el tanque, identificado como V-002, se prepara la salmuera, que será enviada al sedimentador 1 y sedimentador 2. En este tanque también se retroalimenta la salmuera gastada para reutilizarla. La cantidad de sal para preparar solución nueva y para la regeneración de la misma, son las siguientes:

Volumen de agua:	0,70 m <sup>3</sup>
Cantidad de sal para salmuera nueva:	259,00 Kg
Cantidad de sal para regeneración:	18,00 Kg

#### 4.2.4. Extracción líquido – líquido

En la operación de extracción con salmuera, se usarán dos tanques identificados como V-003 (sedimentador 1) para la primera etapa y V-004 (sedimentador 2) para la segunda etapa.

Al sedimentador 1, se le alimentará la solución de salmuera proveniente del V-002 y aceite de fusel crudo proveniente del V-001 o TK-001, según la disponibilidad de la materia prima. Mientras que, el sedimentador 2 recibe el refinado del V-003 y la solución de salmuera del V-002. La Tabla 4.11 muestra la carga por lote:

**Tabla 4.11. Volumen requerido por etapa de extracción L-L**

Volumen requerido	1era etapa [m <sup>3</sup> ]	2da etapa [m <sup>3</sup> ]
Aceite de fusel crudo	0,35	0,31
Salmuera	0,35	0,31
Volumen refinado	0,31	0,30
Volumen extracto	0,39	0,32

#### 4.2.5. Tratamiento con sulfato de anhídrido

Este tanque será identificado como V-005 donde se llevará a cabo la refinación final para eliminar las trazas de agua que aún se encuentran presentes en el aceite de fusel.

El V-005 se alimentará con el refinado del V-004 y se añadirá manualmente sulfato de sodio anhídrido. El sulfato de sodio se recuperará a temperatura ambiente. La cantidad de sulfato de sodio anhídrido requerida por el volumen de aceite de fusel a tratar es la siguiente:

Volumen aceite de fusel: 0,30 m<sup>3</sup>  
Cantidad de sulfato de sodio anhídrido: 45,30 Kg

#### 4.2.6. Tanque de almacenamiento de producto terminado

El TK-003 contendrá el aceite de fusel refinado, tendrá la capacidad de almacenar producto por 6 semanas que corresponden a 30 días laborables. La alimentación vendrá del V-005.

#### 4.2.7. Tanque de residuo

El TK-004 contiene los residuos provenientes del V-001 y V-002, durante 10 días hasta su posterior envío a una PTAR. El DQO del efluente es aproximadamente 34000 mg/L.

#### 4.2.8. Cálculo de dimensiones de tanques

Las materias primas estarán almacenadas a temperatura ambiente y presión atmosférica. Los tanques tendrán las siguientes características: forma cilíndrica y un margen de seguridad del 10% respecto al volumen contenido. La relación considerada para las dimensiones de los tanques es  $h/D=1,5$  para los tanques verticales y  $D/h=1,5$  para los tanques horizontales.

Para el cálculo de dimensiones de los tanques se usaron las siguientes ecuaciones:

$$V_{diseño} = 1,1(V_{contenido}) \text{ Ec. 1}$$

$$V_{diseño} = \frac{\pi}{4}d^2h \text{ Ec. 2}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4V_{diseño}}{1,5\pi}} \text{ Ec. 3}$$

La altura de la tubería salida para los tanques TK-03, TK-05 y TK-06 corresponde al nivel donde se encuentra la fase superior.

**Tabla 4.12. Dimensiones de los tanques**

Identificación	Disposición	V <sub>diseño</sub> [m <sup>3</sup> ]	D [m]	h [m]	h <sub>salida</sub> [cm]
TK-001	Vertical	13,10	2,20	3,40	-
TK-002	Vertical	2,30	1,30	1,90	-
V-001	Vertical	0,39	0,70	1,03	16
V-002	Vertical	0,77	0,90	1,30	-
V-003	Horizontal	0,77	1,14	0,76	39
V-004	Horizontal	0,77	1,14	0,76	31
V-005	Vertical	0,33	0,70	1,00	-
TK-003	Vertical	37,85	3,18	4,77	-
TK-004	Vertical	2,30	1,30	1,90	-

### 4.3. Dimensionamiento de tuberías

Las tuberías a dimensionar serán construidas con acero inoxidable, cédula 40.

La velocidad media  $\bar{v}$  se obtiene en función del fluido que circule a través de la tubería. El caudal depende de la carga al tanque por lote. El diámetro nominal de cada tubería se escoge con ayuda de las tablas del Anexo D. Las tuberías a instalar se enumeran en la Tabla 4.13.

**Tabla 4.13. Ubicación de las tuberías**

Nº tubería	Inicio	Fin	Fluido a transportar
1	TK-001	V-001	Aceite de fusel
2	TK-002	V-001	Aceite de fusel
3	V-001	V-003	Aceite de fusel
4	TK-001	V-003	Aceite de fusel
5	V-003	V-004	Aceite de fusel
6	V-002	V-003	Salmuera
7	V-002	V-004	Salmuera
8	V-004	V-005	Aceite de fusel
9	V-005	TK-003	Aceite de fusel
10	V-003	V-002	Salmuera
11	V-004	V-002	Salmuera



Las velocidades medias para el aceite de fusel y salmuera son 1,5 y 2,0 m/s (ver Anexo H). El cálculo del diámetro se realizó con ayuda de las siguientes fórmulas.

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} \text{ Ec.4}$$

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \text{ Ec. 5}$$

**Tabla 4.14. Dimensiones de las tuberías**

N° tubería	Q [m³/s]	A [m²]	D [m]	Dn [pulg]	DE [pulg]	DI [pulg]	L[m]*
1	3,33E-05	2,22E-05	0,0065				4,0
2	1,67E-05	1,11E-05	0,0046				4,3
3	4,86E-05	3,24E-05	0,0079				4,3
4	4,86E-05	3,24E-05	0,0079				9,0
5	4,30E-05	2,87E-05	0,0074				3,5
6	4,86E-05	2,43E-05	0,0079	1/4	0,540	0,452	3,5
7	4,30E-05	2,15E-05	0,0074				2,5
8	4,17E-05	2,78E-05	0,0073				2,5
9	4,17E-05	2,78E-05	0,0073				3,0
10	4,86E-05	2,43E-05	0,0079				3,50
11	4,30E-05	2,15E-05	0,0074				3,23

\*La longitud queda a criterio de los autores

#### 4.4. Dimensionamiento de bombas

Se dimensionarán tres bombas: una que alimente del V-005 al TK-003, y de alimentación del V-002 hacia los sedimentadores.

La eficiencia de cada bomba será considerada del 85%

**Tabla 4.15. Potencia de bombas**

Tubería	Identificación	P <sub>teórica</sub> [W]	P <sub>real</sub> [hp]
6	P-01	0,664	0,0010
7	P-02	0,420	0,0010
9	P-03	0,203	0,0003

#### 4.3. Dimensionamiento de motor

Los tanques V-001, V-002 Y V-005 requieren de un agitador, es recomendable que el diámetro del agitador sea entre el 40 al 45% del

diámetro del tanque. (Anchor Institute , 2010). Se optará por utilizar con motores eléctricos, los cuales tienen una eficiencia del 95%.

La potencia necesaria que requiere cada motor son las siguientes:

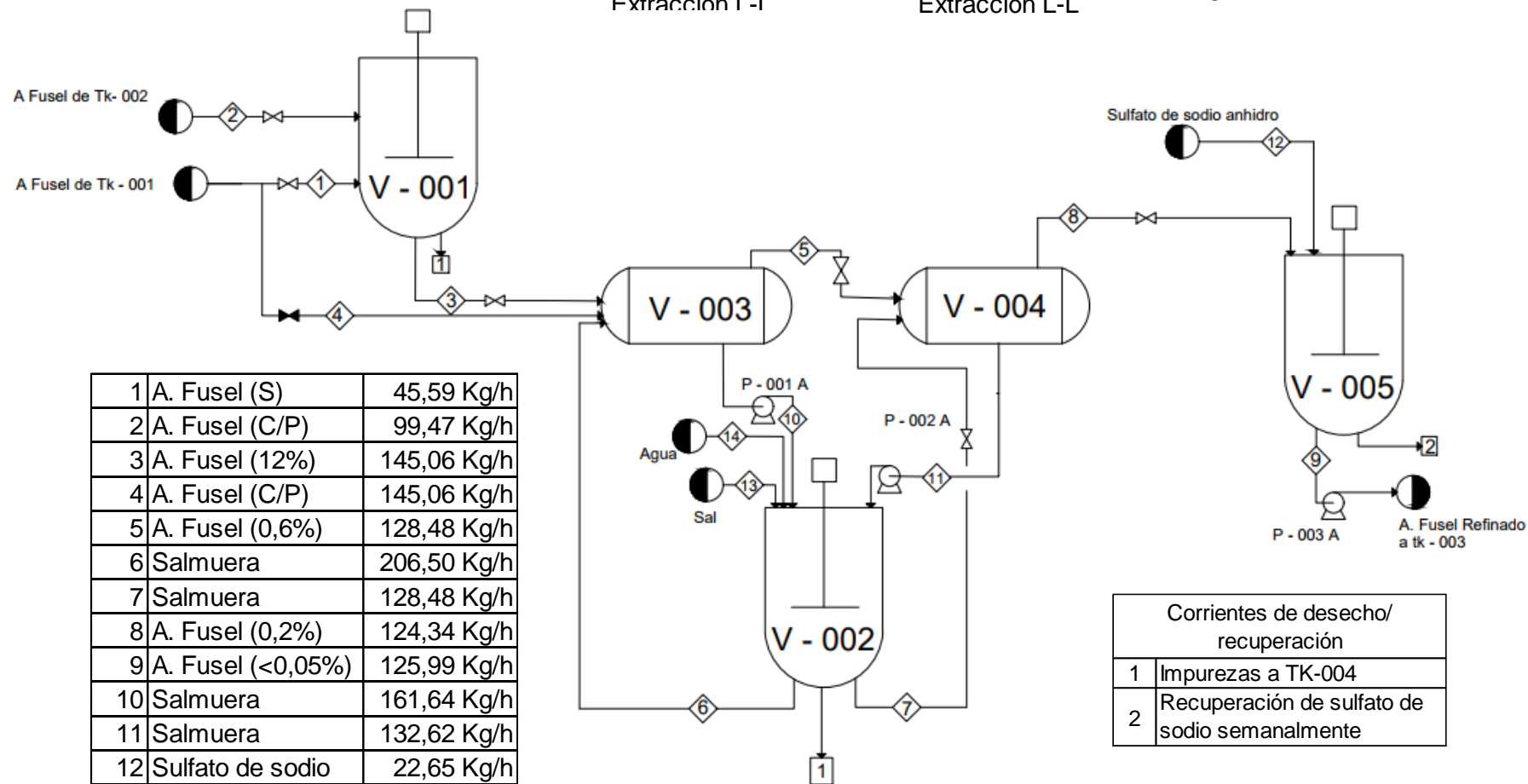
**Tabla 4.16. Potencia de motores**

<b>Identificación</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Potencia real [hp]</b>
M-001	V-001	0,32
M-002	V-002	0,34
M-003	V-005	0,32

#### **4.4. Diagrama de Flujo de Proceso (PFD)**

El diagrama de flujo de proceso se muestra a continuación, con las principales corrientes y equipos.

V-001                      V-002                      V-003                      V-004                      V-005  
 Pre-mezcla                      Salmuera                      Etapa 1                      Etapa 2                      Tratamiento con agente desecante  
 Extracción I - I                      Extracción L-L



1	A. Fusel (S)	45,59 Kg/h
2	A. Fusel (C/P)	99,47 Kg/h
3	A. Fusel (12%)	145,06 Kg/h
4	A. Fusel (C/P)	145,06 Kg/h
5	A. Fusel (0,6%)	128,48 Kg/h
6	Salmuera	206,50 Kg/h
7	Salmuera	128,48 Kg/h
8	A. Fusel (0,2%)	124,34 Kg/h
9	A. Fusel (<0,05%)	125,99 Kg/h
10	Salmuera	161,64 Kg/h
11	Salmuera	132,62 Kg/h
12	Sulfato de sodio	22,65 Kg/h
13	Sal	139,50 Kg/h
14	Agua	350,00 Kg/h

◇ Corriente principal  
 □ Corriente de desecho/recuperación

Corrientes de desecho/recuperación	
1	Impurezas a TK-004
2	Recuperación de sulfato de sodio semanalmente

Elaborado por:  
 Mero & Zambrano, 2017

#### **4.5. Análisis de costos**

Con el fin de analizar económicamente si el proyecto a escala industrial es rentable, se hizo una estimación para un tiempo de evaluación de 10 años.

El año cero corresponde a poner en marcha la planta, es decir la inversión inicial. El flujo de caja se efectuó en base a la capacidad de la planta y una producción sin proyección de crecimiento.

##### **4.5.1. Inversión inicial**

La estimación de la inversión de capital de una planta química es la inversión necesaria para la adquisición, montaje e instalación de todos los equipos e infraestructura requerida para llevar a cabo los procesos. En este caso, el costo de cada equipo está referenciado del "EQUIPMENT COSTS", 5th edición, Peters, Timmerhaus, & West.

Los costos de los equipos principales no representan el costo total de la inversión inicial, puesto que hay costos directos (montaje y erección de equipos, instrumentación, etc.) y costos indirectos (diseño e ingeniería, gastos generales, contingencias, etc.). Existen factores que permiten estimar estos costos adicionales.

Una vez definidos estos factores, el dimensionamiento y el tipo de material a utilizar, se procede a estimar la inversión inicial.

No se tuvo en cuenta gastos por localización y administración, debido a que se proyectó que la mini planta estará dentro de las instalaciones de la destilería SODERAL S.A.

##### **4.5.2. Costos de equipos**

###### **4.5.2.1. Equipos**

En la Tabla 4.17 se detalla el costo de los tanques de almacenamiento en función de la capacidad diseñada y la estructura del material. En el cálculo del costo de los tanques V-001, V-002, V-005 está incluido el motor de agitación.

**Tabla 4.17. Costos de tanques de almacenamiento**

<b>Identificación</b>	<b>Material</b>	<b>Costo (\$)</b>
TK-001	Acero al carbono	15.347
TK-002	Acero al carbono	4.521
V-001	Acero al carbono	1.500
V-002	Acero al carbono	1.500
V-003	PVC	225
V-004	PVC	225
V-005	Acero al carbono	1.500
TK-003	Acero al carbono	24.280
TK-004	Acero al carbono	4.521
<b>Total</b>		<b>53.619</b>

**4.5.2.2. Bombas**

Luego de hacer los respectivos cálculos, En la Tabla 4.18 se especifica el precio de cada bomba función de la potencia real de trabajo.

**Tabla 4.18. Costos de bombas**

<b>Identificación</b>	<b>Costo (\$)</b>
P-01	65
P-02	65
P-03	65

**4.5.3. Capital fijo**

Una vez estimado el costo en dólares de los equipos principales que se muestran en la Tabla 4.19, se procede a calcular el capital fijo.

**Tabla 4.19. Costo de los equipos principales**

<b>Equipos</b>	<b>Costo (\$)</b>
Tanques	53.619
Bombas	195
<b>Total</b>	<b>53.814</b>

La estimación del capital fijo se calculó empleando los factores  $f$ , que se especifican en la Tabla 4.20 y la Tabla 4.21, cuyo resultado fue \$193.730.

**Tabla 4.20. Factores para estimar costos directos**

f1 Montaje y erección de equipos	<b>0,4</b>
f2 Tuberías	0,7
f3 Instrumentación	0,2
f4 Eléctricos	0,1
f5 Edificios	No requerido
f6 Suministros	No aplica

**Tabla 4.21. Factores para estimar costos indirectos**

f10 Diseño e Ingeniería	<b>0,3</b>
f11 Honorarios del Contratista	Poco probable para pequeños proyectos de planta
f12 Contingencias	0,1
f14 Eléctricos	0,1

El capital de la operación se asume el 10% del capital fijo y se calcula el capital total requerido. En la Tabla 4.22 se muestra el desglose para obtener capital total requerido.

**Tabla 4.22. Resultados del capital total requerido**

Detalle	Valor (\$)
Capital fijo	193.730,40
Capital de la operación	29.059,56
Capital total requerido	222.789,96

La inversión inicial para una planta deshidratadora de aceite de fusel que tiene una capacidad de 365000 litros al año, se estima en \$ 222.789,96

#### 4.5.4. Costos de la producción

Los costos de producción, son parte importante en la estimación del análisis económico, algunas veces presentan valores más altos que la inversión inicial. En la Tabla 4.23 se explican los costos de operación dividiéndolos en costos fijos y costos variables, los costos de materia prima ya fueron detallados en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.23. Costos de operación**

<b>Detalle</b>	<b>Valores típicos de producción</b>	<b>Costo (\$)</b>
<b>Costos Variables</b>		
Repuestos varios	10% del Mantenimiento	2.227,90
Materia prima (MP)	\$3,97/lt	757.126,80
Envasado y Transporte	\$1/producto envasado	1'076.228,57
Tratamiento de efluentes	\$300/Tn	12.136,58
Suministros	\$0,012/MJ	402,04
<b>Total</b>		1'848.121,90
<b>Costos Fijos</b>		
Mantenimiento	10% Inversión inicial	22.279,00
Mano de obra (MO)	Salario unificado	16.800
Laboratorio	70% MO	11.760
Seguros	1% Capital fijo	1.937,30
Financiamiento	6% Capital fijo	11.623,82
Supervisión	Salario unificado	33.600
Patentes y licencias	4% Capital fijo	7.749,22
<b>Total</b>		105.749,34

Considerando que se requieran 2 operadores y se trabaja un turno de 8 horas diarios, se procede a calcular los costos de operación.

#### **4.5.5. Rentabilidad del proyecto**

Para el flujo de caja se tuvo en cuenta que el rendimiento de la producción es del 86% y al año 1 la producción será el 60% de la capacidad total de la planta, aumentando el 20% cada año. Los ingresos se calcularon por la venta anual del 40% de la producción en el primer año, 75% de la producción en al año 2 y 100% en los siguientes años. El precio se tasó en \$2,50 por presentación de 125 ml. En la Tabla 4.24 se muestra el flujo de cada de los primeros 10 años del proyecto y en la Tabla 4.25 los resultados del análisis de rentabilidad del proyecto.

**Tabla 4.24. Flujo de caja**

<b>Años</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Producción</b>	-	188340,00	251120,00	313900,00	313900,00	313900,00	313900,00	313900,00	313900,00	313900,00	313900,00
<b>Ingresos</b>	-	1076228,57	2690571,43	4484285,71	4484285,71	4484285,71	4484285,71	4484285,71	4484285,71	4484285,71	4484285,71
<b>Costos fijos</b>	-	105749,34	105749,34	105749,34	105749,34	105749,34	105749,34	105749,34	105749,34	105749,34	105749,34
<b>Costos variables</b>	-	1848121,89	2464162,53	3080203,16	3080203,16	3080203,16	3080203,16	3080203,16	3080203,16	3080203,16	3080203,16
<b>Costo total</b>	-	1953871,23	2569911,87	3185952,50	3185952,50	3185952,50	3185952,50	3185952,50	3185952,50	3185952,50	3185952,50
<b>Flujo anual</b>	-	-877642,66	120659,56	1298333,22	1298333,22	1298333,22	1298333,22	1298333,22	1298333,22	1298333,22	1298333,22
<b>Inversión inicial</b>	222789,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Utilidad antes de imp</b>	-222789,96	-877642,66	120659,56	1298333,22	1298333,22	1298333,22	1298333,22	1298333,22	1298333,22	1298333,22	1298333,22
<b>Impuestos (8%)</b>	-	-	9652,76	103866,66	103866,66	103866,66	103866,66	103866,66	103866,66	103866,66	103866,66
<b>Flujo neto</b>	-222789,96	-877642,66	1194466,56	1194466,56	1194466,56	1194466,56	1194466,56	1194466,56	1194466,56	1194466,56	1194466,56
<b>Flujo acumulado</b>	-222789,96	-1100432,62	-979773,06	318560,15	1616893,37	2915226,59	4213559,80	5511893,02	6810226,23	8108559,45	9406892,67

**Tabla 4.25. Resultados de rentabilidad del proyecto**

VAN	\$ 3'150.875,99
TIR	61,79%
PAYBACK	3 años 1 mes



# **CAPÍTULO 5**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 5.1. Conclusiones

- ✓ Luego de caracterizar el aceite de fusel de las tres destilerías nacionales, se determinó que está constituido principalmente por los alcoholes isobutanol e isoamilico, que representan un 80% de la composición en base seca, seguido de propanol cuyo valor está entre 14-18%.
- ✓ El aceite de fusel proveniente de Soderal S.A., presentó un contenido de agua superior (40%) frente a Producargo S.A y CODANA que contenían 12%.
- ✓ Para llevar a cabo la deshidratación del aceite de fusel de las tres destilerías nacionales, se determinó experimentalmente que al mezclar la muestra de Soderal, con las muestras de Producargo S.A y CODANA en una relación 1:2 respectivamente, se logra obtener una mezcla con un contenido final del 12%.
- ✓ Dentro de los 4 métodos evaluados para reducir el contenido de agua, la extracción líquido-líquido utilizando salmuera, logró mejores resultados al remover el 98% de agua del aceite de fusel crudo.
- ✓ La mejor alternativa sostenible para deshidratar el aceite de fusel hasta un valor por debajo del 0,05% se obtuvo combinando la extracción líquido-líquido usando salmuera en dos etapas con una etapa adicional empleando sulfato de sodio.
- ✓ El aceite de fusel mezclado en una proporción del 5% con gasolina Ecopaís, eleva el octanaje de 85 a 89,1; además cumple las normativas impuestas por el ente regulador de hidrocarburos del país (ARCH).
- ✓ El valor comercial del aceite de fusel como bioaditivo es de \$2,50, frente al de los aditivos comerciales que tienen un costo de alrededor de \$8,00.
- ✓ De acuerdo a la producción de aceite de fusel de las tres destilerías principales del país, la capacidad de la planta es 365000 litros al año,

trabajando en un turno diario, con una producción de aceite de fusel deshidratado de 312000 litros anuales.

- ✓ La inversión necesaria para implementar la planta de deshidratación de aceite de fusel es \$222.789, teniendo en cuenta los costos de adquisición, montaje e instalación. La inversión será recuperada en aproximadamente tres años un mes.
- ✓ El Valor Actual Neto del proyecto es de \$3'150.875 con una Tasa Interna de Retorno de 61,79%, lo que indica que el proyecto es rentable.

## **5.2. Recomendaciones**

- ✓ Difundir los resultados de la presente investigación al Ministerio de Industrias y Productividad, el cual está encargado del cambio de la matriz productiva.
- ✓ Dar a conocer los resultados de la presente investigación a la comunidad científica del país y en Congresos de Ingeniería Química.
- ✓ Hacer llegar los resultados del proyecto a las tres destilerías nacionales, de donde proviene la materia prima, estas son: Soderal S.A, Codana S.A., y Producargo S.A.
- ✓ Profundizar la investigación del uso del aceite de fusel deshidratado, en otras áreas como la industria de solventes.
- ✓ Promover antes las autoridades de la ESPOL, inicien con el registro de la propiedad intelectual de la presente investigación ante el organismo competente.
- ✓ Llevar la experimentación a escala piloto para analizar la rentabilidad del proyecto a escala industrial.

## REFERENCIAS

- Acuña, F. (2006). *Química Orgánica* (Primera ed.). San José: EUNED.
- Alameda, M. B. (2015). *Removing water from and azeotropic ethanol- water mixture through adsorption*. Worcester: Worcester Polytechnic Institute.
- Anchor Institute . (2010). *Process Engineering: Agitation & Mixing*. Gujarat: Industries Commissionerate & DDU.
- Andréa de Padua, C. M. (2011). *Herbicidal Potentiality of Fusel Oil* . Brasil: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.
- Brau, H. (1957). *Review on the origin and composition of fusel oil*. Río Piedras: Universidad de Puerto Rico.
- Carbonell, J. C. (2009). En *Pinturas y recubrimientos: Introducción a su tecnología* (págs. 89-90). Madrid: Diaz de Santos S.A.
- Carrasco, M. S. (2000). En *Tratado de emergencias médicas* (pág. 1531). Madrid: ARÁN EDICIONES S.A.
- Dabbagh, H., Ghobadi, F., Ehsani, M., & Moradmand, M. (2013). *The influence of ester additives on the properties of gasoline*. Isfahan. Fuel: Isfahan.
- Dietsche, K.-H. (2003). En *Manual de la técnica del automóvil* (págs. 318-320). Alemania: BOSCH.
- Doerner, M. (2005). *Los materiales de pintura y su empleo en el arte*. España: Editorial Reverté.
- EcuRed. (30 de Junio de 2017). Obtenido de EcuRed: <https://www.ecured.cu/Salmuera>
- Encyclopædia Britannica*. (1911).
- Garcia, V. (2008). *Subproduto de destileria de óleo fusel: Caracterização química e estudo de sua aplicação industrial*. São Caetano do Sul: Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário de Instituto Mauá de Tecnologia.
- Gibaja, S. (1998). *Pigmentos Naturales*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Grace Davison. (2010). Adsorbents for Process Applications. *SYLOBEAD*, 28.
- H.A. Dabbagh, F. Ghobadi, M.R. Ehsani, M. Moradmand. (2013). *The influence of ester additives on the properties of gasoline*. Isfahan, Irán: Fuel.
- Instrumental Pasteur . (09 de Junio de 2017). Obtenido de Instrumental Pasteur : <http://www.instrumentalpasteur.com.ar/rotaevaporador.php>
- Küçük, Z., & Ceylan, K. (1998). Potential utilization of fusel oil: a kinetic approach for production of fusel oil esters through chemical reaction. *Turk J Chem*, 289-300.

- Kujawski, W., & Capala, W. (2001). Application of membrane pervaporation process to the enhanced separation of fusel oils. *Chemistry Central Journal*, 53-55.
- Marin, C. (2016). *Tratamiento y mezclado del aceite de fusel de las destilerías de alcohol etílico, para su aprovechamiento como combustible combinado con diésel para calderas*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Mendes-Ferreira, A., Barbosa, C., Patricia, L., & Mendes-Faia, A. (2011). The impact of nitrogen on yeast fermentation and wine quality. *SciELO Portugal*, 3.
- Michael Rondón, Juan Mantilla . (2015). *Solubility analysis of gasoline-ethanol-water mixtures at different pressures and temperatures*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Neel, J. (1991). *Pervaporation. Membrane Separation Process*. Amsterdam: Elsevier.
- Palencia, F. (2014). *Influencia de los aditivos sobre las propiedades de las gasolinas*. Asturias, España.
- Patil, A., Butala, H., & Koolwal, S. (2002). Fusel Oil: Composition, removal and potential utilization. *International Sugar Journal*, 51-58.
- Pérez, E. H. (2010). *Aprovechamiento del Aceite de Fusel para la obtención de productos químicos de alto valor agregado*. Santa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- ProEcuador. (2013). *Biocombustibles*.
- Quintana, R. (2011). *Poder calorífico de las sustancias más usuales*.
- Repositorio Universidad de Sevilla. (04 de julio de 2017). Obtenido de [https://rodas5.us.es/file/116d23b8-c458-2012-481b-2357ffa2b34/2/modulo\\_general\\_SCORM.zip/pagina\\_19.htm](https://rodas5.us.es/file/116d23b8-c458-2012-481b-2357ffa2b34/2/modulo_general_SCORM.zip/pagina_19.htm)
- Rondón, M., & Mantilla, J. (2015). *Solubility analysis of gasoline-ethanol-water mixtures at different pressures and temperatures*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Severns, W. H. (2007). En *La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases* (págs. 108-109). Madrid: EDITORIAL REVERTÉ S.A.
- Suzuki, M. (1990). *Adsorption Engineering*. Tokyo: Elsevier Science .
- Treybal, R. (1985). *Operaciones con transferencia de masa*. La Habana, Cuba.
- Triboli, E. (1995). *Tecnologia de Produção de Etanol*. São Caetano do Sul: Apostila Escola De Engenharia Mauá.
- Universidad de Barcelona. (03 de Julio de 2017). *Operaciones básicas en el laboratorio de química*. Obtenido de <http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/index1.html>

UOP LLC. (2009). *Adsorbents. An introduction to zeolite molecular sieves*. New Jersey: UOP.

Villegas A, A. O. (2006). *Análisis Ultravioleta-visible. la Teoría Y la Práctica en El Ejercicio Profesional*. Mérida, México: Universidad Autónoma de Yucatán.

Wade, L. (2011). *Química Orgánica* (Séptima ed., Vol. 1). México D.F.: Pearson Educación de México.

## GLOSARIO

<b>Abrasión</b>	Desgaste de un material o tejido debido al rozamiento o fricción.
<b>Alifáticos</b>	Son compuestos orgánicos constituidos por carbono e hidrógeno, en donde los carbonos presentes forman cadenas abiertas.
<b>Caldo</b>	Es un medio líquido que se adecúa para la reproducción de bacterias.
<b>Copolímero</b>	Se usa para modificar las propiedades de los plásticos artificiales a las necesidades específicas
<b>Co-solvente</b>	Se utilizan para diluir las soluciones obtenidas con los disolventes, si se coloca en exceso inestabilizaría la solución.
<b>Craquear</b>	Romper las moléculas de ciertos compuestos al someterlos a altas temperaturas.
<b>Descarboxilación</b>	Reacción química en la cual un grupo carboxilo se separa a partir del dióxido de carbono.
<b>Elástomeros</b>	Polímeros que tienen no metales en su composición y muestran un comportamiento elástico.
<b>Emulsión</b>	Dispersión de dos líquidos inmiscibles, obteniéndose una mezcla más o menos homogénea.
<b>Éteres</b>	Es el resultado de la combinación de dos moléculas de alcohol.

<b>Furfural</b>	Es un líquido de color amarillo claro y ambarino, cuyo olor es como almendra amarga o formaldehído.
<b>Hidrólisis</b>	Reacción de descomposición de compuestos orgánicos por acción del agua.
<b>Índice de cetano</b>	Es un indicador de la capacidad de ignición del diésel.
<b>Isocianatos</b>	Son compuestos en donde el grupo isocianato –NCO, está unido a un radical orgánico.
<b>Kauri</b>	Resina que se extrae de una especie de coníferas: <i>Agathis australis</i> .
<b>Ligante</b>	Sustancia química que se añade a un sustrato para crear una capa entre éste y el subsiguiente, formando una película de acabado.
<b>Mosto</b>	Es un líquido dulce, cuyos azúcares son metabolizados por las levaduras para generar el alcohol de una bebida.
<b>Nitrocelulosa</b>	Derivado de la celulosa que se utiliza para formar explosivos plásticos, lacas, selladores, tintas, barnices, etc.
<b>Polaridad</b>	Propiedad que representa la separación de las cargas eléctricas en una molécula.
<b>Refinado</b>	Corriente de alimentación ya tratada en una extracción líquido-líquido.
<b>Sustrato</b>	El sustrato es una molécula donde actúa una enzima, que luego se transforma en producto.
<b>Transaminación</b>	Reacción entre un aminoácido y un alfa-cetoácido, en la que se transfiere el grupo amino a este último.



**Vinílicos**

Cualquier compuesto que tenga un grupo radical correspondiente a la molécula de etileno en su estructura.

# **ANEXOS**

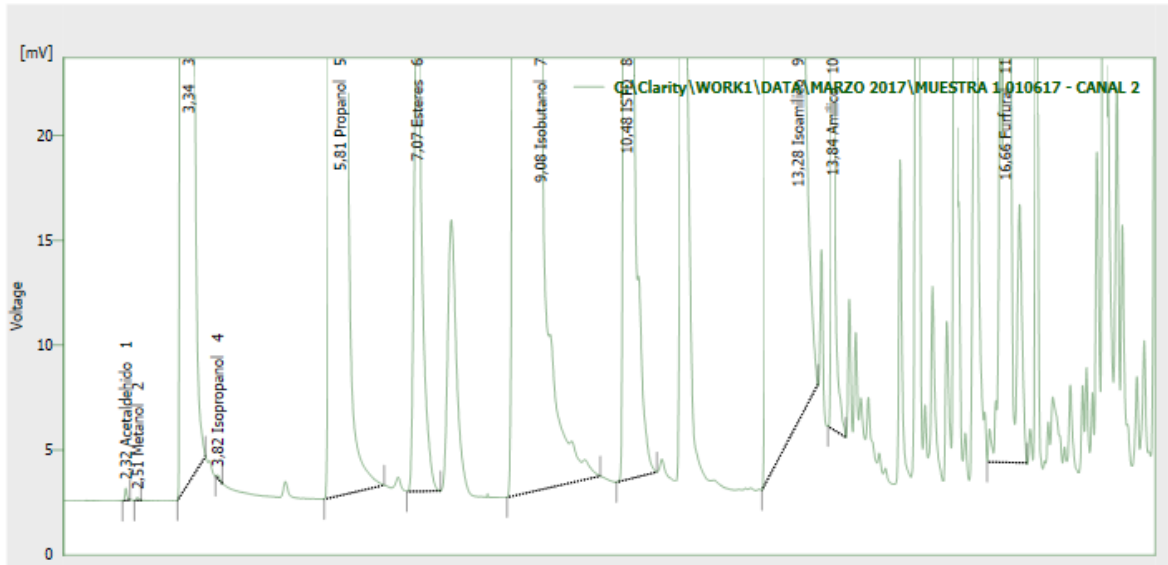
## Anexo A. Cromatografía de gases aceite de fusel crudo

### A1. Cromatografía de gases Muestra 1

01/06/2017 16:16

Chromatogram C:\Clarity\WORK1\DATA\MARZO 2017\MUESTRA 1 010617.PRM

Page 2 of 2



Result Table (ESTD - C:\Clarity\WORK1\DATA\MARZO 2017\MUESTRA 1 010617 - CANAL 2)

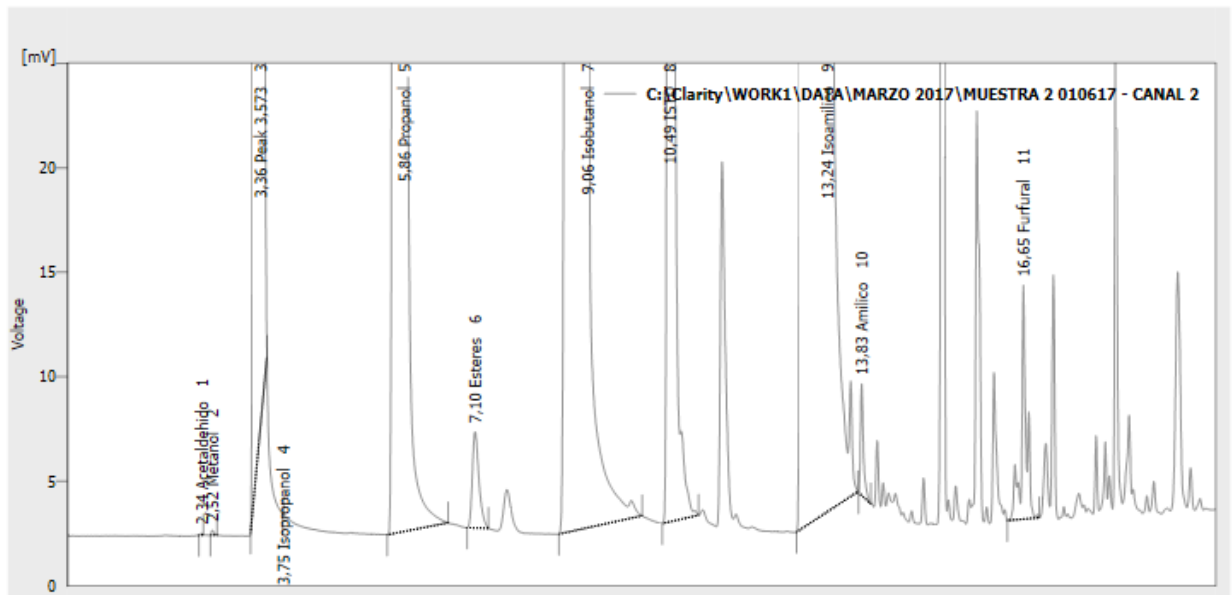
	Reten. Time [min]	Response	Amount [mg/100cc]	Amount [%]	Peak Type	Compound Name
1	2.323	1,384	1,278	127,8	Ordnr	Acetaldehído
2	2.513	0,469	0,418	41,8	Ordnr	Metanol
3	3.343	8698,964	0,000	0,0		
4	3.820	0,624	0,292	29,2	Ordnr	Isopropanol
5	5.810	8549,753	4874,108	487410,8	Ordnr	Propanol
6	7.070	215,757	163,039	16303,9	Ordnr	Esteres
7	9.080	24319,174	11438,319	1143831,9	Ordnr	Isobutanol
8	10.483	956,406	126,623	12662,3	ISTD	ISTD
9	13.277	32842,311	16822,735	1682273,5	Ordnr	Isoamilico
10	13.843	145,879	79,034	7903,4	Ordnr	Amilico
11	16.657	576,997	365,452	36545,2	Ordnr	Furfural
	Total		1,000	3387129,7		

## A2. Cromatografía de gases Muestra 2

01/06/2017 16:19

Chromatogram C:\Clarity\WORK1\DATA\MARZO 2017\MUESTRA 2 010617.PRM

Page 2 of 2



Result Table (ESTD - C:\Clarity\WORK1\DATA\MARZO 2017\MUESTRA 2 010617 - CANAL 2)

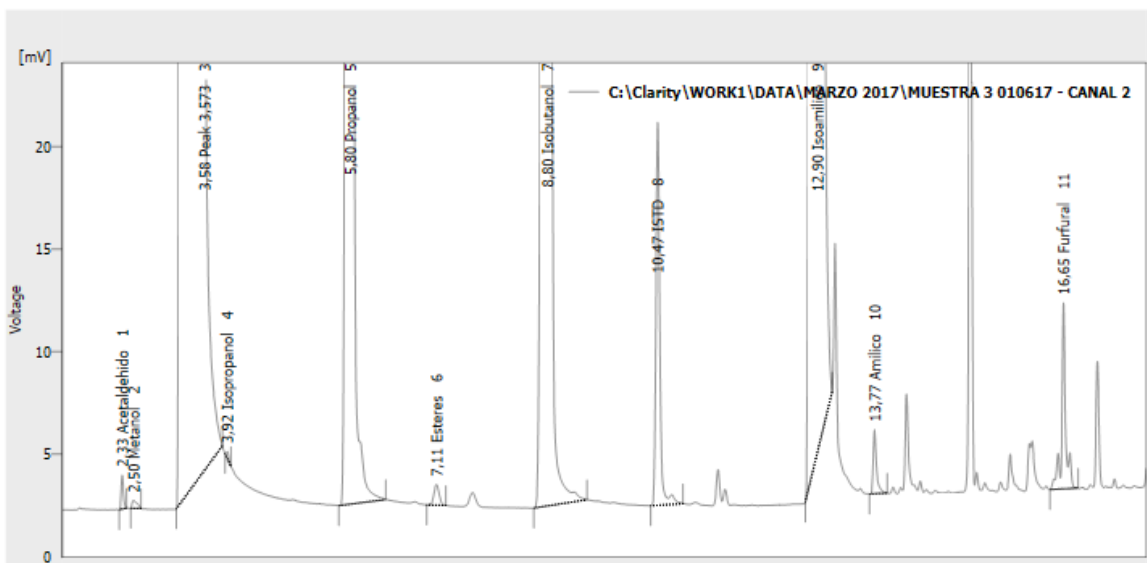
	Reten. Time [min]	Response	Amount [mg/100cc]	Amount [%]	Peak Type	Compound Name
1	2,337	0,155	0,143	14,3	Ordnr	Acetaldehído
2	2,517	0,739	0,659	65,9	Ordnr	Metanol
3	3,357	8331,626	N/A	N/A	Error	Peak 3,573
4	3,753	0,011	0,005	0,5	Ordnr	Isopropanol
5	5,863	10146,375	5784,322	578432,2	Ordnr	Propanol
6	7,097	36,935	27,910	2791,0	Ordnr	Esteres
7	9,057	21171,430	9957,804	995780,4	Ordnr	Isobutanol
8	10,490	892,871	118,211	11821,1	ISTD	ISTD
9	13,237	30069,988	15402,675	1540267,5	Ordnr	Isoamilico
10	13,833	18,919	10,250	1025,0	Ordnr	Amilico
11	16,653	67,170	42,543	4254,3	Ordnr	Furfural
	Total		1,000	3134452,3		

### A3. Cromatografía de gases Muestra 3

01/06/2017 16:21

Chromatogram C:\Clarity\WORK1\DATA\MARZO 2017\MUESTRA 3 010617.PRM

Page 2 of 2



Result Table (ESTD - C:\Clarity\WORK1\DATA\MARZO 2017\MUESTRA 3 010617 - CANAL 2)

Reten. Time [min]	Response	Amount [mg/100cc]	Amount [%]	Peak Type	Compound Name
1	4,021	3,712	371,2	Ordnr	Acetaldehido
2	2,075	1,849	184,9	Ordnr	Metanol
3	24462,622	N/A	N/A	Error	Peak 3,573
4	0,974	0,456	45,6	Ordnr	Isopropanol
5	2010,943	1146,414	114641,4	Ordnr	Propanol
6	5,642	4,263	426,3	Ordnr	Esteres
7	2688,510	1264,518	126451,8	Ordnr	Isobutanol
8	77,662	10,282	1028,2	ISTD	ISTD
9	8607,559	4409,029	440902,9	Ordnr	Isoamilico
10	11,136	6,033	603,3	Ordnr	Amilico
11	38,528	24,402	2440,2	Ordnr	Furfural
Total		1,000	687095,8		

## Anexo B. Catálogo de viscosímetros para verificación de la lectura del equipo

Catalog No.	Size	Approximate Constant, cSt/s	Kinematic Viscosity Range, cSt
378-025-C01	25	0.002	0.5 to 2
378-050-C01	50	0.004	0.8 to 4
378-075-C01	75	0.008	1.6 to 8
378-100-C01	100	0.015	3 to 15
378-150-C01	150	0.035	7 to 35
378-200-C01	200	0.1	20 to 100
378-300-C01	300	0.25	50 to 250
378-350-C01	350	0.5	100 to 500
378-400-C01	400	1.2	240 to 1,200
378-450-C01	450	2.5	500 to 2,500
378-500-C01	500	8.0	1,600 to 8,000
378-600-C01	600	20.0	4,000 to 20,000
378-650-C01	650	45.0	9,000 to 45,000
378-700-C01	700	100.0	20,000 to 100,000

## Anexo C. Velocidad de rotación de centrífugas para varios diámetros

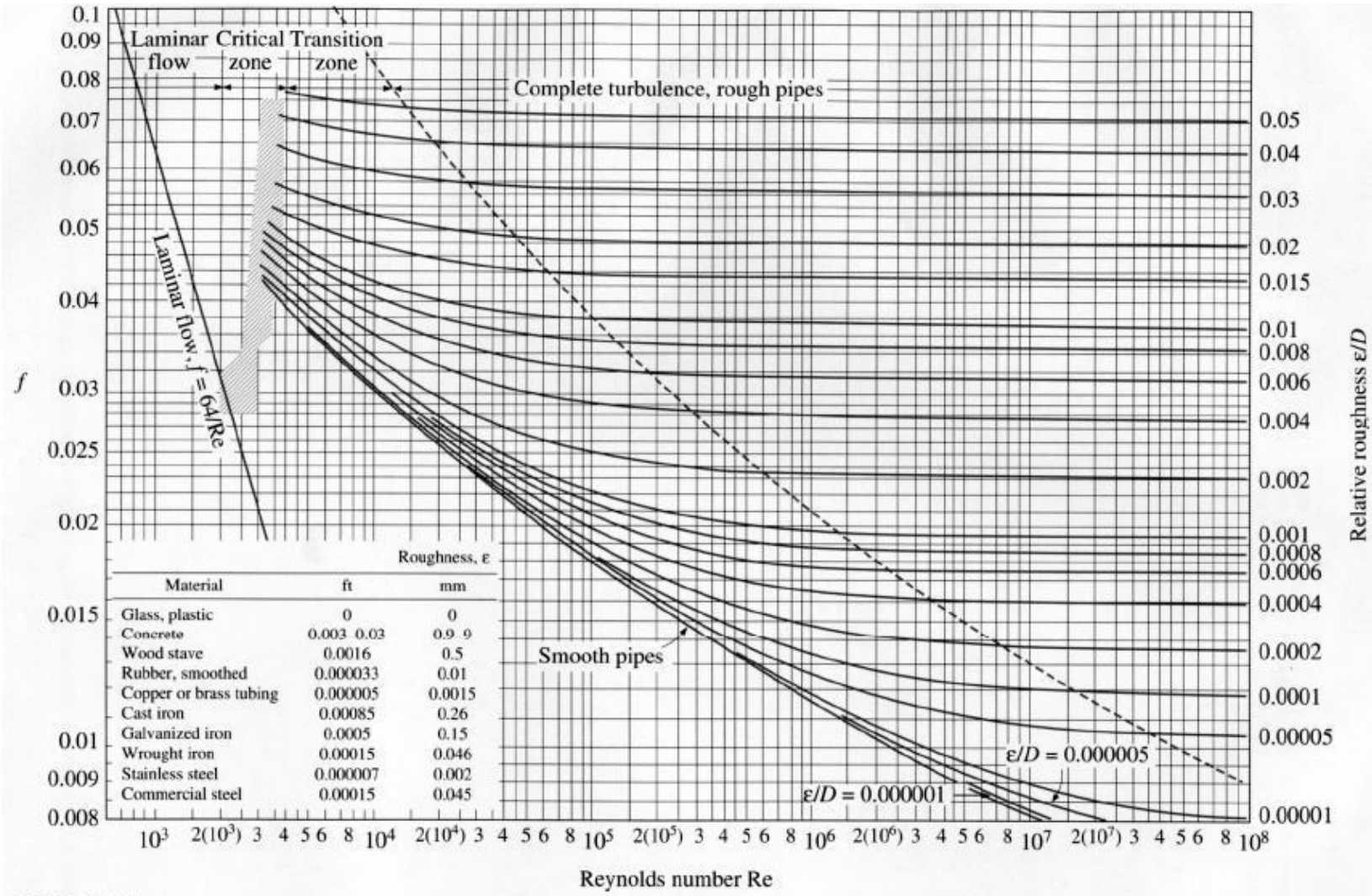
Diameter of Swing (in)	Revolutions per Minute at 500 rcf	Revolutions per Minute at 800 rcl
12	1710	2160
13	1650	2080
14	1590	2000
15	1530	1930
16	1480	1870
17	1440	1820
18	1400	1770
19	1360	1720
20	1330	1680
21	1300	1640
22	1270	1600
23	1240	1560
24	1210	1530

Measured in inches between tips of opposite tubes when in totating position

## Anexo D. Catálogo de tuberías

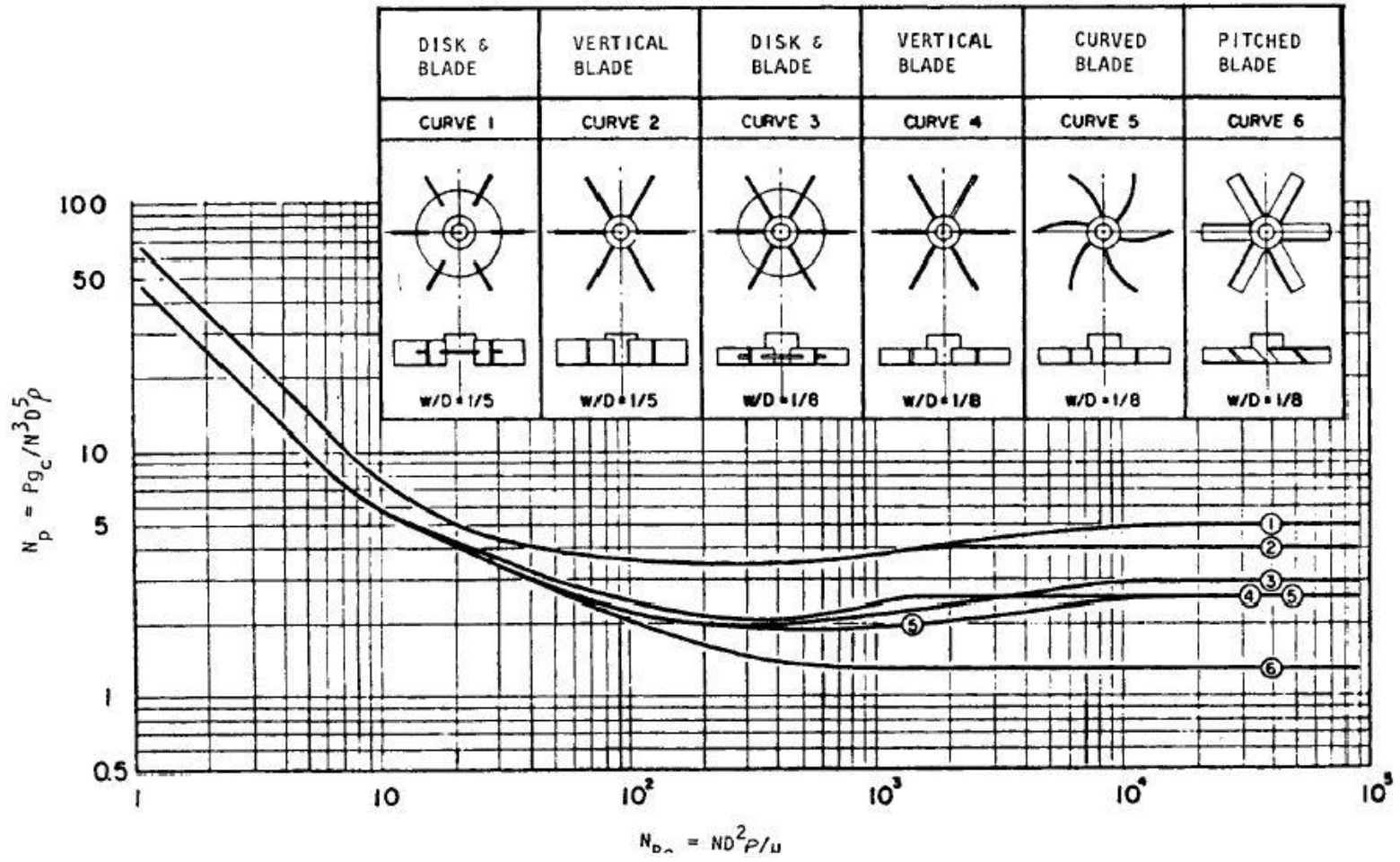
DIMENSIONES Y PRESIONES DE TRABAJO DE TUBERÍA DE CÉDULA (PIPE) ASTM A312																				
Diámetro Nominal NPS	Diám. Ext.		Cédula 10						Cédula 40						Cédula 80					
			Grosor Pared		Presión Ing. Trab.		Peso Aprox.		Grosor Pared		Presión Ing. Trab.		Peso Aprox.		Grosor Pared		Presión Ing. Trab.		Peso Aprox.	
	pg	mm	pg	mm	PSI	kg/m	Lb/pie	kg/m	pg	mm	PSI	kg/m	Lb/pie	kg/m	pg	mm	PSI	kg/m	Lb/pie	kg/m
1/8	.405	10.29	.049	1.24	4270	300	.19	.28	.068	1.73	6170	434	.25	.37	0.095	2.41	9200	646	0.31	0.47
1/4	.540	13.72	.065	1.65	4240	298	.33	.49	.088	2.24	5970	420	.43	.63	0.119	3.02	8520	599	0.54	0.8
3/8	.675	17.15	0.65	1.65	3320	233	.42	.63	.091	2.31	4810	338	.57	.85	0.126	3.2	7000	492	0.76	1.1
1/2	.840	21.34	.083	2.11	3420	240	.67	1.00	.109	2.77	4610	324	.85	1.27	0.147	3.73	6486	456	1.1	1.62
3/4	1.050	26.67	.083	2.11	2690	189	.86	1.28	.113	2.87	3750	264	1.13	1.69	0.154	3.91	5296	372	1.49	2.2
1	1.315	33.40	.109	2.77	2830	199	1.40	2.09	.133	3.38	3510	247	1.68	2.50	0.179	4.55	4689	342	2.19	3.24
1 1/4	1.660	42.16	.109	2.77	2210	155	1.81	2.69	.140	3.56	2880	202	2.27	3.39	0.191	4.85	4039	284	3.02	4.47
1 1/2	1.900	48.26	.109	2.77	1920	135	2.09	3.11	.145	3.68	2590	182	2.72	4.05	0.2	5.08	3664	258	3.67	5.41
2	2.375	60.33	.109	2.77	1520	107	2.64	3.93	.154	3.91	2180	153	3.65	5.45	0.218	5.54	3158	222	5.07	7.48
2 1/2	2.875	73.03	.120	3.05	1380	97	3.53	5.27	.206	5.16	2390	168	5.79	8.64	0.276	7.01	3312	233	7.73	11.41
3	3.500	88.90	.120	3.05	1120	79	4.33	6.46	.216	5.49	2070	146	7.58	11.30	0.3	7.62	2893	203	10.35	15.27
3 1/2	4.000	101.60	.120	3.05	980	69	4.97	7.42	.226	5.74	1890	133	9.11	13.58	0.318	8.08	2683	188	12.62	18.67
4	4.500	114.30	.120	3.05	867	61	5.61	8.37	.237	6.02	1750	123	10.79	16.09	0.337	8.56	2499	176	15.12	22.32
6	6.625	168.28	.134	3.4	655	46	9.29	13.85	.280	7.11	1395	98	18.97	28.28	0.432	10.97	2152	151	28.84	42.56
8	8.625	219.08	.148	3.76	555	39	13.40	19.98	.322	8.18	1227	86	28.55	42.57	0.5	12.7	1913	134	43.79	64.64
10	10.750	273.05	.165	4.19	495	35	18.70	27.88	.365	9.27	1113	78	40.48	60.36	0.5	12.7	1803	127	55.25	96.01

### Anexo E. Diagrama de Moody





### Anexo F. Curva de agitadores



### Anexo G. Rugosidad para tuberías

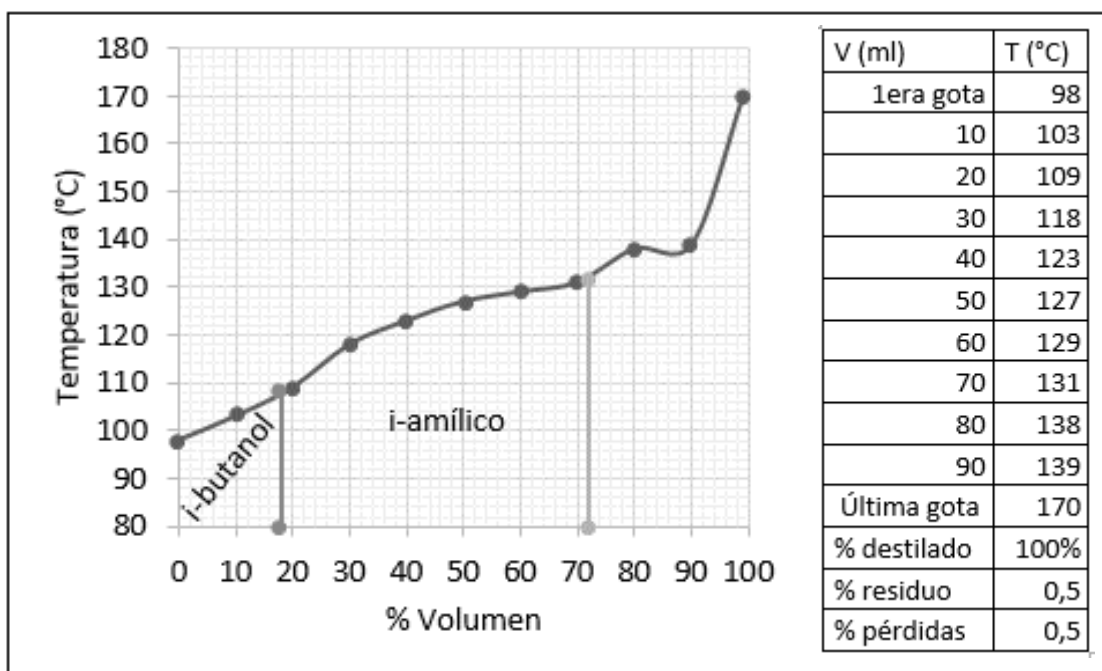
Material	Rugosidad (m)	Rugosidad (ft)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	$3,0 \times 10^{-7}$	$9,8 \times 10^{-7}$
Tubo extruido, cobre, latón y acero	$1,5 \times 10^{-6}$	$4,9 \times 10^{-6}$
Acero comercial o soldado	$4,6 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-4}$
Hierro galvanizado	$1,5 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil recubierto	$1,2 \times 10^{-4}$	$3,9 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil no recubierto	$2,4 \times 10^{-4}$	$7,9 \times 10^{-4}$
Concreto, bien fabricado	$1,2 \times 10^{-4}$	$3,9 \times 10^{-4}$
Acero Remachado	$1,8 \times 10^{-4}$	$5,9 \times 10^{-4}$

### Anexo H. Velocidad media de fluidos

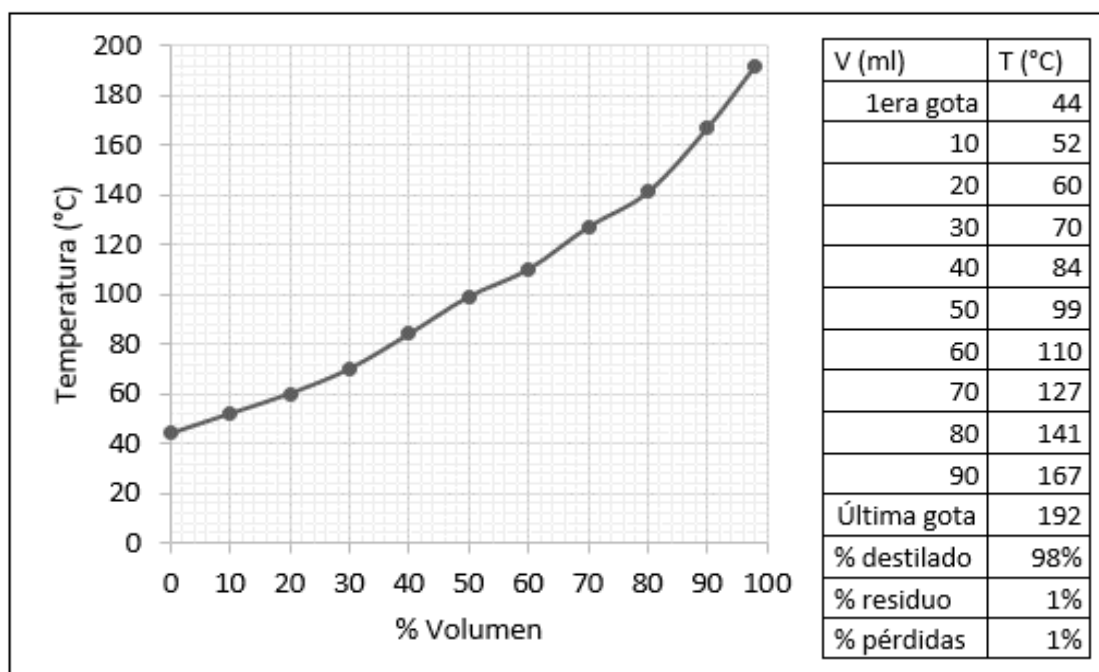
- Vapor de agua saturado o ligeramente recalentado a presión de 0 a 2 Kg/cm <sup>2</sup> .....	20 m/s
- Vapor de agua saturado o ligeramente recalentado a presión > 2 Kg/cm <sup>2</sup> .....	30 m/s
- Vapor de agua recalentado a presión < 14 Kg/cm <sup>2</sup> .....	50 m/s
- Vapor de agua recalentado a presión > 14 Kg/cm <sup>2</sup> .....	50-70 m/s
- Agua, en servicios normales.....	1,2-1,8 m/s
- Amoníaco líquido.....	1,8 m/s
- Amoníaco gas.....	30 m/s
- Aceites.....	1,5 m/s
- Cloro líquido.....	1,5 m/s
- Gas natural.....	30 m/s
- Hidrógeno.....	20 m/s
- Aire (0-2 Kg/cm <sup>2</sup> ) .....	20 m/s
- Oxígeno (temperatura ambiente) .....	10 m/s
- Ácido sulfúrico.....	1,2 m/s
- Agua de mar (en tubería recubierta de goma) .....	1,5-2,4 m/s
- Agua de mar (en tubería recubierta de cemento) .....	1,5-3,5 m/s

## Anexo I: Curva de destilación ASTM

### I1. Aceite de fusel refinado



### I2. Gasolina y bioaditivo (aceite de fusel)



## Anexo J: Cálculos

### Apéndice J1. Dimensionamiento de bombas

El cálculo de la potencia de bombas se realizó con las siguientes fórmulas:

$$P_{teórica} = h_A * \rho * g * Q \text{ Ec. 8}$$

$$P_{real} = \frac{P_{teórica}}{E} \text{ Ec. 9}$$

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 + h_A = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + h_T \text{ Ec. 10}$$

En la Ec. 10, los términos de altura y caída de presión se eliminan ya que la salida y entrada es al mismo nivel, y ambos puntos se encuentran sometidos a la misma presión.

$$h_A = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + h_T \text{ Ec. 11}$$

$$h_T = \frac{f L \bar{v}^2}{2Dg} \text{ Ec. 12}$$

$$Re = \frac{D\bar{v}}{\gamma} \text{ Ec. 13}$$

Teniendo en cuenta los siguientes datos:

$$\gamma = 2,04 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\varepsilon = 2 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$D = 0,0114 \text{ m}$$

Los cálculos se resumen en la Tabla:

### Resumen de cálculos

Tubería	Re	F	Q [m <sup>3</sup> /s]	V <sub>1</sub> [m/s]	V <sub>2</sub> [m/s]	H <sub>T</sub> [m]	h <sub>A</sub> [m]
6	11255,7	0,019	4,9 x 10 <sup>-5</sup>	8x10 <sup>-5</sup>	7,5 x 10 <sup>-5</sup>	1,2	1,21
7	11255,7	0,019	4,3 x 10 <sup>-5</sup>	7x10 <sup>-5</sup>	6,6 x 10 <sup>-5</sup>	0,8	0,84
9	8441,8	0,020	4,2 x 10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	1,4 x 10 <sup>-5</sup>	0,6	0,64

Elaborado por: Mero & Zambrano, 2017

### Apéndice J2. Dimensionamiento de motores

La potencia del motor se determina mediante las siguientes fórmulas:

$$N' Re = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \text{ Ec. 14}$$

$$P_{teórica} = N p N^3 D_a^5 \rho \text{ Ec. 15}$$

$$P_{real} = \frac{P_{teórica}}{\varepsilon} \text{ Ec. 16}$$

### Motor para V-001

El M-001 pertenece al V-001, en el cual se homogeniza el aceite de fusel. Los datos son los siguientes, teniendo en consideración el diámetro del tanque (0,70 m).

Diámetro del tanque= 0,70 m

$\rho=828,9 \text{ Kg/m}^3$

$N= 2 \text{ rps}$

$D_a= 0,30 \text{ m}$

$\mu= 1,69 \times 10^{-03} \text{ Kg/ m.s}$

$$N' Re = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu}$$

$$N' Re = \frac{(0,30 \text{ m}^2)(2 \text{ rps})(828,9 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3})}{1,69 \times 10^{-03} \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 8,8 \times 10^4$$

Gráficamente (Apéndice G)  $N_p$  corresponde a 2,5 y reemplazando en la Ec.

15

$$P = (2,5)(2)^3(0,3)^5(828,9) = 223,8 \text{ W} = 0,30 \text{ hp}$$

$$P_{real} = \frac{0,30}{0,95} = 0,32 \text{ hp}$$

### Motor para V-002

El M-002 pertenece al V-002, en el cual se prepara la solución de salmuera. Los datos son los siguientes, teniendo en consideración el diámetro del tanque (0,90 m).

Diámetro del tanque= 0,90 m

$\rho=1180 \text{ Kg/m}^3$

$N= 2 \text{ rps}$

$D_a= 0,40 \text{ m}$

$\mu= 8,71 \times 10^{-04} \text{ Kg/ m.s}$

$$N' Re = \frac{(0,40 \text{ m}^2)(2 \text{ rps})(1180 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3})}{8,71 \times 10^{-04} \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 4,3 \times 10^5$$

Gráficamente (Apéndice G)  $N_p$  corresponde a 2,5 y reemplazando en la Ec. 15

$$P = (2,5)(2)^3(0,4)^5(1180) = 244 \text{ W} = 0,32 \text{ hp}$$

$$P_{real} = \frac{0,32}{0,95} = 0,34 \text{ hp}$$

### Motor para V-005

El M-003 pertenece al V-005, en el cual se elimina las trazas del aceite de fusel con sulfato de sodio. Los datos son los siguientes, teniendo en consideración el diámetro del tanque (0,70 m).

Diámetro del tanque = 0,70 m

$\rho = 828,9 \text{ Kg/m}^3$

$N = 2 \text{ rps}$

$D_a = 0,30 \text{ m}$

$\mu = 1,69 \times 10^{-03} \text{ Kg/ m.s}$

$$N' Re = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu}$$

$$N' Re = \frac{(0,30 \text{ m}^2)(2 \text{ rps})(828,9 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3})}{1,69 \times 10^{-03} \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 8,8 \times 10^4$$

Gráficamente (Apéndice G)  $N_p$  corresponde a 2,5 y reemplazando en la Ec. 15

$$P = (2,5)(2)^3(0,3)^5(828,9) = 223,8 \text{ W} = 0,30 \text{ hp}$$

$$P_{real} = \frac{0,30}{0,95} = 0,32 \text{ hp}$$

## Anexo K

### K1. Medición de grados alcohólicos



### K2. Decantación de la mezcla de muestra



K3. Extracción líquido-líquido a 40 °C

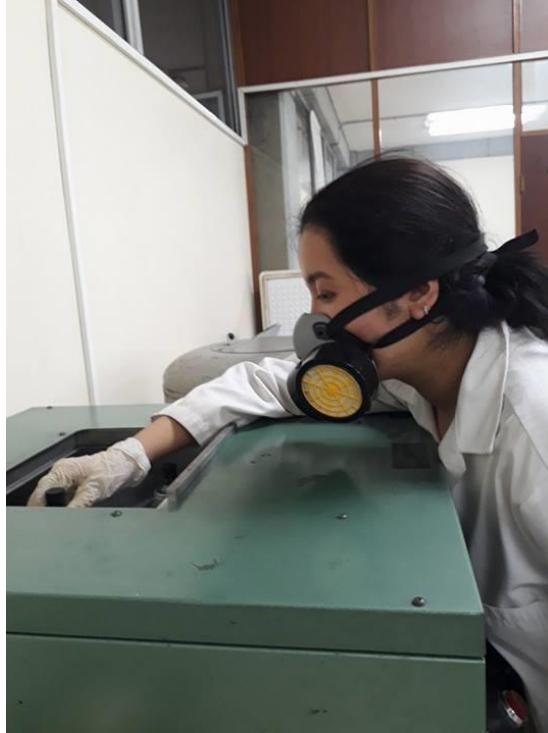


K4. Punto de inflamación Copa Abierta





K5. Colocación de muestra para medición de contenido de agua



K6. Medición de viscosidad



### K7. Destilación ASTM del aceite de fusel refinado



### K8. Digestión de los efluentes de salmuera gastada para medición de DQO



## K9. Prueba de octanaje



## Anexo L. Abreviaturas

% m/v	Porcentaje masa/volumen
% v/v	Porcentaje volumen/volumen
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
°K	Grados Kelvin
Å	Angström(s)
atm	Atmósfera(s)
BTU	British Thermal Unit: Pulgada/hora-pie <sup>2</sup> -°F
Ca	Calcio
cm	Centímetro (s)
cm <sup>3</sup>	Centímetro(s) cúbico(s)
cSt	Centistoke(s)
ft	Pie(s)
G	Gramo(s)
hp	Caballos de fuerza
K	Potasio
Kg	Kilogramo(s)
KJ	Kilojoule(s)
KPa	Kilopascal(es)
L	Litro(s)
Lb	Libra(s)
Li	Litio
m	Metro(s)
m <sup>2</sup>	Metro(s) cuadrado(s)
m <sup>3</sup>	Metro(s) cúbico(s)
MJ	Megajoule(s)
mL	Mililitro(s)
mm	Milímetro(s)
mm Hg	Milímetros de mercurio
mm <sup>3</sup>	Milímetro cúbico
Na	Sodio
Rpm	Revoluciones por minuto

Rps	Revoluciones por segundo
W	Watt(s)

## Anexo M. Simbología

$\mu$	Viscosidad dinámica
A	Área
D	Diámetro
$D_a$	Diámetro del agitador
DE	Diámetro externo de tubería
DI	Diámetro interno de tubería
$D_n$	Diámetro nominal
F	Factor de fricción
G	Gravedad
H	Altura
$h_A$	Carga de trabajo
$h_{Salida}$	Altura de salida de tanque
$h_T$	Pérdidas por carga
L	Longitud de tubería
N	Número de etapas
N	Velocidad de rotación del agitador
$N'_{Re}$	Número de revoluciones
$N_p$	Número de potencia
$P_{1-2}$	Presión en el punto 1 ó 2
$P_{real}$	Potencia real de la bomba
$P_{teórica}$	Potencia teórica de la bomba
Q	Flujo volumétrico o caudal
Re	Número de Reynolds
T	Temperatura
$V_{1-2}$	Velocidad en el punto 1 ó 2
$V_{Diseño}$	Volumen de diseño de tanque
$Z_{1-2}$	Altura con respecto al nivel de referencia
$\Gamma$	Viscosidad cinemática
P	Densidad