



Universidad Iberoamericana

Estudios con reconocimiento de validez oficial por decreto presidencial del 3 de abril de 1981.

“Diseño conceptual de un esquema de proceso de destilación para la reutilización de aceites gastados”

Tesis

Que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Presenta

César Alejandro Vásquez Cano

Director de Tesis

Dr. Martín Rivera Toledo

Lectores: Dr. Iván Quevedo Partida
Dr. Armando Ramírez Serrano

Ciudad de México, 2018

Para Vivian:

“En realidad las cosas verdaderamente difíciles son todo lo que la gente cree poder hacer a cada momento”

-Julio Cortazar-

Agradecimientos

A Rubén y Alejandra, padres excepcionales: Por su cariño, dedicación y ser un gran ejemplo de éxito. Por brindarme lo mejor de ustedes día con día. Por su apoyo infinito en momentos difíciles y por sus risas en momentos gratos. Por no rendirse y permitirme hoy estar aquí. No podría describir la gratitud de tenerlos como padres. Son lo máximo, los amo.

A Vivian Schmeis: Por tu amor espacial y cariño constante. Por dejarme compartir esta vida contigo y no titubear ni un segundo. Porque sin ti me encontraría lejos de terminar este proyecto. Por ser apoyo incondicional y mi compañera en este universo.

Al Doctor Martín Rivera: Por su tutoría a lo largo de este proyecto y ser un docente fuera de serie. Por ser un gran amigo y brindarme todo su apoyo durante este y otros proyectos, profesionales y personales. Por ser una asombrosa persona.

A David Mendoza: Por demostrarme lo que es ser un amigo. Por tus consejos, pláticas y sinceridad. Por ser de esas personas en las que siempre puedo confiar.

A Guideon y Timothy: Porque aunque quizá nunca lean esto, siempre estarán en mi corazón. Gracias por cambiar mi vida.

A mi guitarra y a la música: Por acompañarme durante todo tipo de momentos a lo largo de este viaje. Por permitirme encontrar inspiración y fuerza. Por ser ese lugar donde puedo refugiarme y seguir adelante.

A mis sinodales, Iván Quevedo y Armando Ramírez por ser grandes profesores y sobre todo amigos. Gracias por acompañarme hoy.

A todos mis profesores, al personal administrativo en especial a Normis y a la Universidad Iberoamericana por tantos años de aprendizaje y buenos momentos en sus aulas.

Al CONACYT y al IMP, en especial a Gonzalo Hernández por permitirme terminar este proyecto en tiempo y forma. Por el apoyo económico y académico brindado durante este periodo.

A todos aquellos amigos, familiares que están y a los que ya no están porque cada uno de ustedes ha contribuido a mi crecimiento personal y profesional.

Índice de contenido

Capítulo 1

Introducción.....	11
2.1 Aceites lubricantes vírgenes	14
2.1.1 Características de los aceites lubricantes vírgenes	14

Capítulo 2

2.2 Aceites usados.....	15
2.3 Pretratamientos físicos y químicos para aceites usados	15
2.4 Re-refinamiento de los aceites usados sin pretratamiento.....	15
2.5 Pretratamiento y re-refinamiento.	16
2.6 Columnas de destilación.....	16
2.6.1 Configuración “destilación ordinaria”	16
2.6.2 Configuración Petlyuk.....	17
2.6.3 Configuración pared dividida (DWC).....	18
2.7 Optimización.....	19
2.7.1 Elementos de la optimización	19
2.7.2 Problema de optimización	19
2.7.2 Clasificación y solución de los problemas de optimización	20
2.7.3 Optimización multiobjetivo	20
2.7.4 Técnicas de optimización multiobjetivo.....	22
2.8 Aspen Plus	22
2.9 Sustentabilidad	22
2.9.1 Índices de sustentabilidad	23

Capítulo 3

3.1 Selección de aceite usado.....	26
3.1.1 Ingreso de la alimentación al programa de simulación	27
3.2 Propiedades fisicoquímicas de los aceites usados.....	27
3.2.1 Propiedades termodinámicas de los aceites usados.....	28
3.3 Caracterización del aceite virgen.....	29
3.4 Diseño del proceso de torres de destilación ordinaria	29
3.4.1 Diseño de torres en serie	29
3.4.2 Ingreso de parámetros para torres de destilación en serie.....	30
3.5 Diseño de torres de destilación tipo Petlyuk	31
3.5.1 Ingreso de datos en el proceso de destilación Petlyuk.....	32
3.5.2 Plato de alimentación de las corrientes de recirculación	32
3.6 Diseño de torre de destilación de pared dividida (DWC)	32
3.6.1 Ingreso de datos para la destilación de pared dividida (DWC).....	33
3.7 Optimización	34
3.7.1 Ingreso de datos de optimización al simulador Aspen Plus	35
3.7.1 Aceites candidatos a solución factible	35
3.8 Frontera de Pareto	36
3.9 Evaluación económica	36

3.10 Índices de sustentabilidad	36
---------------------------------------	----

Capítulo 4

4.1 Indicadores de sustentabilidad.....	38
4.1.1 Intensidad de masa y conversión.....	38
4.1.2 Potencial de Calentamiento Global (GWP).....	41
4.1.3 Intensidad de energía específica (R_{SEI}).....	41
4.1.4 Costo capital	42
4.2 Caracterización del producto	43
4.3 Diseño de una torre DWC	45
4.5 Instalación de Planta	48

Capítulo 5

Conclusiones	51
--------------------	----

Anexos

Trabajo a futuro	53
Bibliografía	55

Capítulo 2

Tabla 2.1 Características fisicoquímicas de diferentes aceites vírgenes	15
Figura 2.1 Configuración "destilación ordinaria"	17
Figura 2.2 Configuración ordinaria en serie (Obtención de 3 productos)	17
Figura 2.3 Configuración Petlyuk	18
Figura 2.4 Arreglos de columnas de pared dividida (adaptado de [8]).....	18
Figura 2.5 Clasificación de la programación en optimización (adaptado de [19])	20
Figura 2.6 Frontera de Pareto (adaptado de [18]).....	21

Capítulo 3

Figura 3.3 Diagrama de decisión para métodos termodinámicos [adaptado de 21]..	28
Figura 3.4 Ingreso de ecuación termodinámica al programa de simulación	28
Tabla 3.2 Cortes del aceite virgen proporcionados por el IMP.....	29
Tabla 3.3 Caracterización de aceites proporcionados por el IMP.....	29
Figura 3.5 Diagrama de simulación de torres en serie.....	30
Figura 3.6 Ingreso de datos a la corriente de alimentación	30
Figura 3.7 Ingreso de parámetros para la columna C1 y C2.....	31
Figura 3.8 Diagrama de simulación de la destilación tipo Petlyuk	31
Figura 3.9 Ingreso de columna sin condensador.....	32
Figura 3. 10 Diagrama de simulación para el proceso DWC.....	33
Figura 3.12 Ingreso de datos para torre de destilación sin rehervidor, ni condensador	33
Figura 3.13 Ingreso de datos para torre de destilación sin rehervidor	34
Figura 3.14 Ingreso de datos de optimización	35

Capítulo 4

Gráfica 4. 1 Conversión de producto en aceite neutro ligero	38
Gráfica 4. 2 Conversión de materia prima en aceite husos.....	39
Gráfica 4.3 Conversión de producto en aceite neutro ligero y aceite husos.....	39
Gráfica 4. 4 Intensidad de masa total del producto.....	40
Gráfica 4. 5 Potencial de calentamiento global para las tres configuraciones	41
Gráfica 4. 6 Intensidad de energía específica para las tres configuraciones	42
Tabla 4. 1 Comparación de costos entre columna DWC y Petlyuk para el aceite 2.	42
Gráfica 4. 7 Costo capital de los procesos simulados	43
Tabla 4. 2 Porcentaje de error en el corte del ANL para los tres procesos simulados.	44
Tabla 4. 3 Porcentaje de error en el corte del AH para dos procesos simulados	44
Tabla 4. 4 Caracterización óptima del ANL del aceite 1.....	44
Tabla 4. 5 Caracterización óptima del ANL del aceite 2.....	44
Tabla 4. 6 Caracterización óptima del ANL del aceite 3	45
Gráfica 4. 9 Frontera de Pareto obtenida para el aceite 2 configuración ordinaria .	46
Gráfica 4. 10 Frontera de Pareto Obtenida para el aceite 2 configuración Petlyuk ..	46
Tabla 4. 6 Condiciones de operación óptimas del aceite 1	47
Tabla 4. 7 Condiciones de operación óptimas del aceite 2	48
Tabla 4. 8 Condiciones de operación óptimas del aceite 3	48

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
<i>AH</i>	Aceite Husos	-
<i>ANL</i>	Aceite Neutro Ligero	-
<i>ASTM</i>	<i>American Society of Testing Materials</i>	-
<i>BASF</i>	Compañía " <i>Badische Anilin- und Soda-Fabrik</i> "	-
<i>CENAPRED</i>	Centro Nacional de Prevención de Desastres	-
<i>CEP</i>	Chemical Engineers Partners	-
<i>CTM</i>	Costo Capital	<i>USD</i>
<i>DWC</i>	<i>Columna de Pared Dividida</i>	-
<i>GWP</i>	Potencial de Calentamiento, Global o <i>Global Warming Potential</i>	<i>kg de CO₂/Kg de Producto</i>
<i>IM</i>	Intensidad de Masa	<i>kg entrada/kg de producto total</i>
<i>IMP</i>	Instituto Mexicano del Petróleo	-
<i>PC</i>	Programación Cuadrática	-
<i>PE</i>	Programación Entera	-
<i>Petlyuk</i>	Arreglo de columnas de Destilación o Autor	-
<i>PL</i>	Programación Lineal	-
<i>PLEM</i>	Programación Lineal Entera Mixta	-
<i>PNLEM</i>	Programación No Lineal Entera Mixta	-
<i>RSEI</i>	Intensidad de Energía Especifica	<i>kJ/Kg de producto total</i>
<i>Y</i>	Conversión	<i>kg producto total/ kg totales</i>

Tabla I. Lista de acrónimos

Fórmula	Nombre
$C_5H_9NO_2$	N-formil-morfolina
CO_2	Dióxido de Carbono
C_5H_9NO	N-metil-pirrolodina.
NOX	Óxido Nítrico
SOX	Óxidos de Azufre

Tabla II. Lista de fórmulas químicas

<i>Ecuación</i>	<i>Descripción</i>
$\%Error_{corte}$	<i>Porcentaje de error en el corte del aceite simulado</i>
$\%Error_{pfq}$	<i>Porcentaje de error en parámetros fisicoquímicos</i>
E_{AS}	<i>Error del aceite simulado</i>
f_{do}	<i>Función objetivo de la destilación ordinaria</i>
f_{DWC}	<i>Función objetivo de la destilación de pared dividida</i>
Fe	<i>Flujo de entrada</i>
f_{PL}	<i>Función objetivo de la destilación Petlyuk</i>
F_{sp}	<i>Flujo de salida del producto de interés</i>
$g(x)$	<i>Restricción de igualdad</i>
$h(x)$	<i>Restricción de desigualdad</i>
P_{AC}	<i>Valor del aceite comercial</i>
P_{AS}	<i>Valor del aceite simulado</i>
QC_{C1}	<i>Calor del condensador en la columna 1</i>
QC_{C2}	<i>Calor del condensador en la columna 2</i>
QR_{C1}	<i>Calor del rehervidor en la columna 1</i>
QR_{C2}	<i>Calor del rehervidor en la columna 2</i>
Q_{RP}	<i>Calor del rehervidor en el precalentador</i>
x_{AC}	<i>Valor del aceite comercial</i>
x_{AS}	<i>Valor del aceite simulado</i>

Tabla III. Lista de nombres de ecuaciones y sus respectivas variables

Resumen

Debido a la explotación, a la mala distribución y almacenamiento de productos derivados del petróleo en los últimos años, la contaminación de recursos como el agua y el suelo ha venido en aumento. Los aceites gastados pertenecen a los residuos peligrosos producidos en México y anualmente se genera un aproximado de 325 millones de litros y solo se recicla alrededor del 5%. Este trabajo tiene objetivo realizar una comparación de tres tecnologías de destilación diferentes (destilación ordinaria, destilación Petlyuk, destilación de pared dividida) para el reciclaje de aceites gastados, utilizando el programa Aspen Plus™ con restricciones en la calidad del aceite y en los kilogramos de producto obtenido. Así mismo, se calcularon diferentes índices de sustentabilidad (potencial de calentamiento global, intensidad de masa, intensidad de energía específica, costo capital, conversión de reactivo en producto) y se optimizó la cantidad de energía utilizada controlando variables como: temperatura en la corriente de entrada, recirculado en el rehervidor y en el condensador utilizando programación cuadrática secuencial y evaluando el punto óptimo mediante epsilon restringida. La destilación tipo Petlyuk presentó un mejor desempeño en índices como conversión de producto y costo capital. La destilación llevada a cabo mediante pared dividida es un proceso que disminuye la cantidad de energía utilizada en el sistema. Además, se presenta una breve descripción acerca de la instalación de una planta de pared dividida en la delegación Gustavo A. Madero, tomando en cuenta costo de terreno, cantidad de unidades operativas y facilidad de transporte de materia prima.

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN

Debido a la explotación, a la mala distribución y almacenamiento de productos derivados del petróleo en los últimos años, la contaminación de recursos como el agua y el suelo ha venido en aumento. En México, la cantidad de residuos peligrosos producidos durante el año 2015 fue de 53.1 millones de toneladas. Siendo el estado de México una de las mayores productoras de residuos peligrosos contando con un 16.1% del total nacional [28]. Los aceites gastados pertenecen a los residuos peligrosos producidos en México y anualmente se generan alrededor de 325 millones de litros y solo se recicla un aproximado del 5%. La presencia mundial de México en el reciclaje de aceites es casi nula, ya que países como Italia y Dinamarca a pesar de producir una menor cantidad de residuos peligrosos, reciclan hasta 6 veces más. [29,2].

Existen diferentes procesos físicos y químicos para el tratamiento de aceites gastados. Uno de los primeros tratamientos que fueron llevados a cabo, fue el de ácido-arcilla; el cual permitía obtener un rendimiento del 63% [2,4]. Sin embargo, muchos problemas ecológicos se desarrollaron, entre ellos lodos ácidos y tierra gastada. Debido a esto se diseñaron procesos alternativos como la deshidratación, destilación y el hidroacabado.

En 1981, Berry [4] desarrollo un proceso utilizando una serie de destilaciones al vacío con un diseño que permitía minimizar la cantidad de coque producido durante la operación, con la finalidad de evitar el taponamiento de líneas de alimentación, fraccionadores y hornos tubulares. No obstante, este proceso no mejoraba el color del producto lo cual impedía que, debido a su presentación, fuera vendido. Actualmente, los procesos combinan pretratamientos físicos o químicos para permitir eliminar problemas derivados de la generación de coque [4].

El re-refinamiento de los aceites usados comienza con la destilación. Además de recuperar el aceite virgen nuevamente, es posible recuperar subproductos mediante diferentes configuraciones. La separación de más de dos componentes ha sido tradicionalmente lograda mediante el arreglo de columnas en serie. Las configuraciones más utilizadas han sido la directa y la indirecta, en donde el componente ligero o pesado se extrae primero, respectivamente. [5] A este tipo de arreglo se le conoce como configuración ordinaria. En la industria además de la configuración ordinaria (figura 3.5) también se pueden encontrar otros tipos de configuraciones, como Petlyuk (figura 3.8), la cual consiste en un precalentador que posteriormente se alimenta a una columna de destilación, permitiendo obtener más de dos productos al mismo tiempo. Este tipo de configuración permite minimizar gastos de operación e incluso algunas veces de instalación. [5,6] La columna de pared dividida o DWC (figura 3.10) por sus siglas en inglés, es una tecnología que ha tomado mucha popularidad en los últimos años. En un principio su función se limitaba para sistemas con bajas concentraciones de ligeros y pesados. Actualmente tienen una amplia gama de aplicaciones como hidrocarburos, alcoholes, aldehídos, cetonas, acetilos, aminas entre otras. Empresas como BASF, Chevron y ExxonMobil han patentado procesos utilizando columnas DWC [7]. La primera columna DWC fue utilizada por BASF mientras que el diseño y la construcción fueron hechos por Montz GmbH en 1985. [8] Estas tres tecnologías se explican detalladamente en las secciones 2.6.1, 2.6.2 y 2.6.3.

Las ventajas que ofrecen las DWC contra las columnas tradicionales es que concentran dos operaciones en una sola columna, lo cual disminuye la cantidad de intercambiadores de calor, el efecto de remezclado, además, han reportado ahorros de energía de hasta un 30% [9].

A pesar de que las columnas DWC han sido utilizada para diferentes procesos, no se muestra actualmente en la literatura una aplicación que haga referencia al tratamiento de aceites gastados [4,8,9,10].

Este trabajo tiene como objetivo general, proponer el diseño óptimo de las diferentes tecnologías de destilación bajo restricciones de operación, para la reutilización de aceites gastados utilizando herramientas de simulación de procesos químicos. Además de la destilación ordinaria y Petlyuk que actualmente son utilizadas en la industria para el reciclaje de aceites se realiza una comparación con las columnas DWC las cuales no han sido utilizadas para este proceso.

Para cumplir con el objetivo general, se realizaron los siguientes objetivos particulares: Se diseñaron esquemas de destilación ordinaria, Petlyuk y DWC para la regeneración de aceites gastados. Se calculó la configuración óptima para cada uno de estos esquemas utilizando métodos de programación matemática y el simulador ASPEN PLUS™. Se analizó cada una de ellas mediante índices de sustentabilidad, los cuales posteriormente fueron comparados para determinar cuál de éstas fue la opción más viable basados en las ventajas y desventajas que estas ofrecían [11].

La destilación tipo Petlyuk presentó un mejor desempeño en índices como conversión de producto, mejorandola hasta en un 20.7% con respecto a los otros dos tipos de destilación y disminuyendo el costo capital hasta un 14%. La destilación llevada a cabo mediante pared dividida es un proceso que disminuye hasta en un 25% la cantidad de energía utilizada en el sistema y emite alrededor de 0.15 kilogramos de CO₂ por kilogramo de producto al ambiente en su valor más alto.

Todos los procesos de destilación investigados en este trabajo tienen sus ventajas y desventajas. Las destilaciones tipo Petlyuk pueden ser utilizadas cuando se busca obtener la mayor cantidad de producto posible, debido al precalentamiento con el que cuenta este proceso permite una mejor separación. Por otro lado la destilación de pared dividida presenta menos daños ambientales y una disminución en la cantidad de energía utilizada debido a que solo cuenta con un rehedidor y un precalentador. Los arreglos tipo Petlyuk y las columnas DWC obtuvieron dos productos rentables (Aceite Neutro Ligero y Aceite Husos). Mientras que la destilación ordinaria solo obtuvo Aceite Neutro Ligero.

CAPÍTULO

2

ANTECEDENTES TEÓRICOS

Este capítulo brinda algunas de las definiciones más importantes para el entendimiento de los aceites gastados. Proporciona una breve descripción de los procesos que operan a nivel industrial, así como ecuaciones y ayudas visuales que permiten comprender la simulación llevada a cabo en ASPEN PLUS™. Al final del capítulo se describen también los índices de sustentabilidad y su forma de cálculo.

2.1 Aceites lubricantes vírgenes

El aceite lubricante automotriz proviene de las parafinas o de las mezclas de crudo, posteriormente se le agregan aditivos para mejorar sus propiedades. Las principales funciones del aceite lubricante son reducir la fricción, disminuir la cantidad de calor, brindar protección contra la oxidación, disminuir el desgaste y remover contaminantes provenientes del motor.

2.1.1 Características de los aceites lubricantes vírgenes

Las propiedades fisicoquímicas de los aceites gastados dependen de la base de la cual provienen, así como de los aditivos adicionados los cuales pueden mejorar la viscosidad y la resistencia a altas temperaturas.

Los aceites lubricantes contienen diferentes características fisicoquímicas dependiendo de su lugar de origen y el tipo de extracción por los cuales se obtengan. En la Tabla 2.1 se resumen las características fisicoquímicas de diferentes aceites reportados en la literatura [4].

Propiedad	Oklahoma (EUA)	Bartlesville (EUA)	Muestra 1 (Iraq)	Muestra 2 (Iraq)	Mobil Co. (EUA)	NY (EUA)
Gravedad Específica	0.929	0.908	0.902		0.906	0.908
Viscosidad (cSt) @40°C	92	90	-	41.11	59	68
Viscosidad (cSt) @100°C	13	12.5	-	6.21	9.25	10.3
Punto de inflamación (°C)	207.7	185	110	-	101.7	182.2
Punto de fluidez (°C)	-34	-40	-	-	-	-37.2
Residuo carbonico (wt%)	3.25	2.18	4.25	-	-	5.2

Tabla 2.1 Características fisicoquímicas de diferentes aceites vírgenes después de re-refinamiento

2.2 Aceites usados

Un aceite usado es cualquier aceite, ya sea proveniente del petróleo crudo o un aceite sintético, que haya sido refinado y el cual debido a su uso esté se encuentra contaminado con impurezas físicas o químicas. [12]

2.2.1 Contaminantes de los aceites usados

Existen tres tipos de contaminantes para los aceites gastados:

1. Contaminantes externos. - Son todos aquellos que provienen del aire circundante, polvo suciedad o humedad, y por partículas metálicas provenientes del motor como partículas carbonosas, óxidos metálicos, agua, combustible o aditivos.
2. Contaminantes que son producto de la degradación del aceite. - Durante la degradación se forman diferentes productos como: lodos, laca, productos solubles en el aceite.
3. Otros contaminantes. Estos pueden provenir de la limpieza del motor, por ejemplo: los solventes. También, en algunos casos se puede encontrar glicol por sellos defectuosos debido a la corrosión y cavitación. El hollín se encuentra debido a que es un subproducto de la combustión. [4,13]

2.3 Pretratamientos físicos y químicos para aceites usados

Existen diferentes pretratamientos químicos o físicos para el aceite usado. Estos se utilizan para poder separar de manera más sencilla el aceite virgen durante el re-refinamiento o eliminar el color negro producido por el hollín u otros contaminantes. El pretratamiento básico actual para los aceites usados consiste en los siguientes procesos:

1. Deshidratación: Se utiliza para remover gasolina y fracciones de agua resultantes de la operación del motor.
2. Pretratamiento físico o químico del aceite deshidratado.
3. Fraccionamiento de aceite usado pre-tratado.
4. Hidrotratamiento o blending, utilizado para mejorar el color.

Estos procesos pueden ser llevados a cabo de manera sucesiva o no dependiendo de la caracterización del aceite, y pueden variar dependiendo de cada compañía.

2.4 Re-refinamiento de los aceites usados sin pretratamiento.

El re-refinamiento de los aceites usados es aquél que busca la recuperación del aceite virgen. Diferentes destilaciones a lo largo del tiempo han sido probadas con el objetivo de obtener mejores rendimientos. Brinkman y Dickson en 1995, probaron una destilación batch al vacío con resultados poco favorables ya que el producto obtenido fue casi nulo. Por otro lado, al probar la destilación continua, el producto mejoró notablemente, con un rendimiento de hasta un 30%. Actualmente existe el proceso Hylube llevado a cabo en Alemania el cual no necesita de un pretratamiento y llega a obtener rendimientos de hasta un 44%.

2.5 Pretratamiento y re-refinamiento.

El pretratamiento y el re-refinamiento son procesos consecutivos actualmente. Gracias a esto, los rendimientos han mejorado de manera notable. A continuación, se mencionan algunos ejemplos de procesos que incluyen pretratamiento y re-refinamiento:

- El proceso Vaxoon es utilizado en Dinamarca y España, con capacidad de 40,000 ton/año y 42,000 ton/año respectivamente. Se conforma por un pretratamiento químico y una destilación al vacío.
- El proceso Chemical Engineers Partners o CEP por sus siglas en inglés, se encuentra en Finlandia y tiene una capacidad de 60,000 ton/año y produce 42,000 toneladas de aceite virgen por año. Este proceso consta de una evaporación de película y de un hidroprocesamiento.
- El proceso Softlube posee una capacidad de 125,000 ton/año y un rendimiento del 45%, está localizado en Francia. El aceite se trata con aditivos alcalinos y el re-refinamiento consta de una destilación al vacío.

2.6 Columnas de destilación

La destilación, también conocida como fraccionamiento, es una operación unitaria en la cual una alimentación de dos o más componentes es separada en dos o más productos. Los productos incluyen y frecuentemente se limitan, al destilado (parte superior) y el fondo (parte inferior). La alimentación se puede encontrar en estado líquido o en una mezcla vapor-líquido. Los fondos muy seguidos están en estado líquido y el destilado puede ser un líquido, un vapor o ambos.

La destilación se remonta al siglo 1 D.C. Fue utilizada para producir bebidas alcohólicas en el siglo XI en Italia. Actualmente la destilación se utiliza para una gran variedad de procesos incluyendo la separación de aceites usados. [14]

2.6.1 Configuración "destilación ordinaria"

La destilación ordinaria se limita a la separación de dos productos. Consisten en tres corrientes principales: la alimentación, el destilado y el fondo, siendo estos dos últimos los que contienen el producto final. (fig. 2.1)

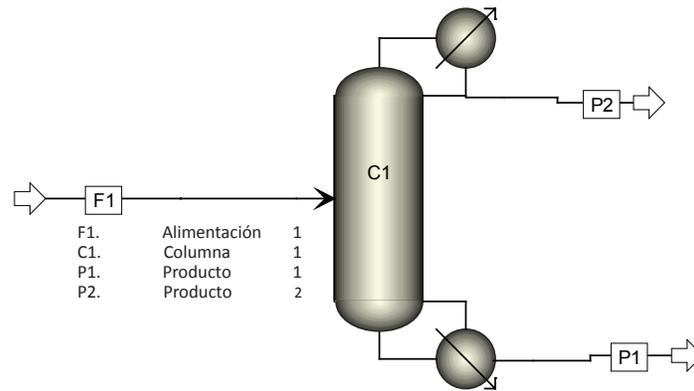


Figura 2.1 Configuración "destilación ordinaria"

Si se quisieran separar más de dos productos estas columnas pueden ser conectadas en serie la cantidad de veces requeridas para obtener los productos deseados como se muestra en la figura 2.2.

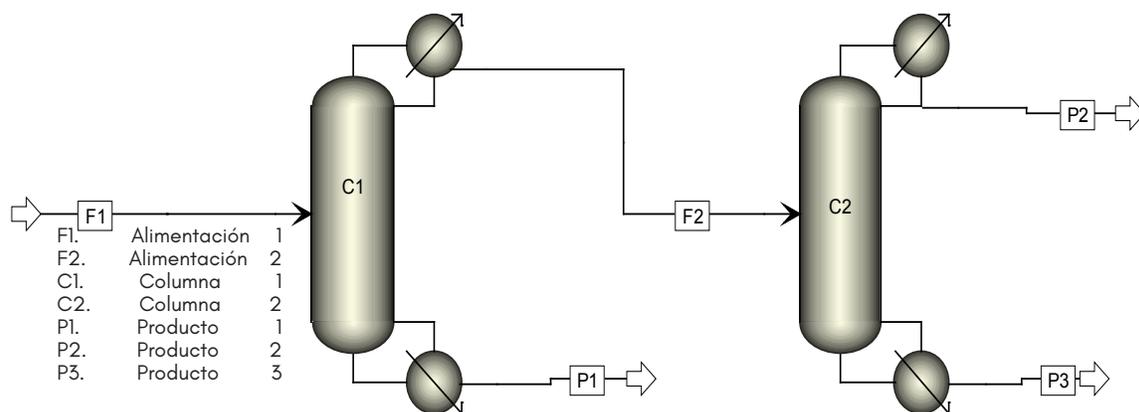


Figura 2.2 Configuración ordinaria en serie (Obtención de 3 productos)

2.6.2 Configuración Petlyuk

La separación de dos o más componentes era tradicionalmente alcanzada mediante una destilación continua de columnas en serie (configuración destilación ordinaria). En 1950, Wright propuso un diseño alternativo para la separación de una alimentación ternaria. No fue hasta 1965 que Petlyuk et al estudiaron este diseño teóricamente y debido a sus aportaciones en esta área, estas columnas llevan su nombre. [5] Este diseño consiste en dos columnas, la primera que es un precalentador, el cual se encuentra conectado a una columna de destilación ordinaria. La configuración Petlyuk permite separar más de dos productos extrayendo el tercero con una corriente lateral. (Fig. 2.3)

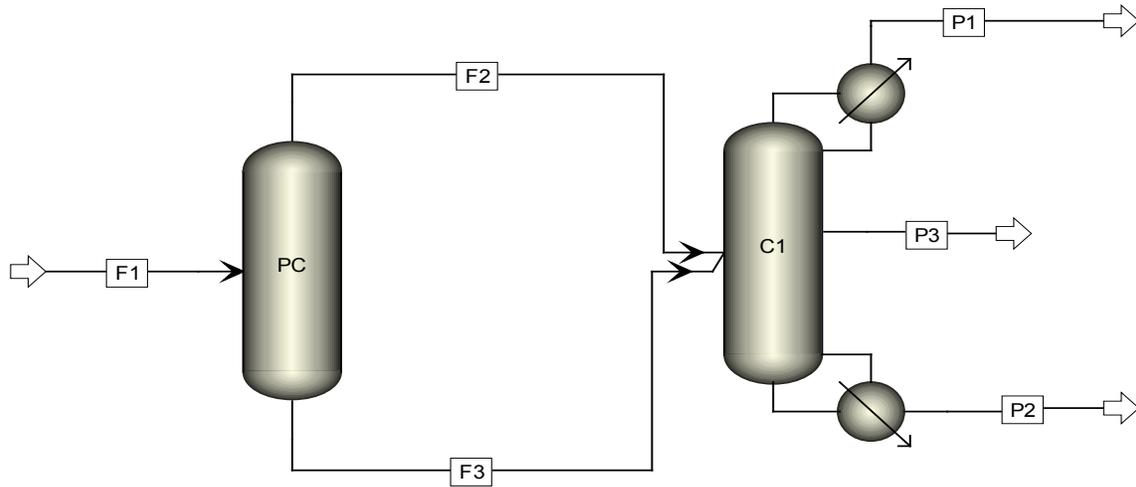


Figura 2.3 Configuración Petlyuk

Este tipo de columnas han demostrado ahorros en inversión y en costos de operación. [5]

2.6.3 Configuración pared dividida (DWC)

Las columnas de pared dividida integran dos procesos en uno. Contienen una pared en medio que simula otra columna de destilación. Este proceso permite una separación de tres componentes o más. Existen diferentes tipos de arreglos. La figura 2.4 muestra los arreglos básicos de este tipo de columnas.

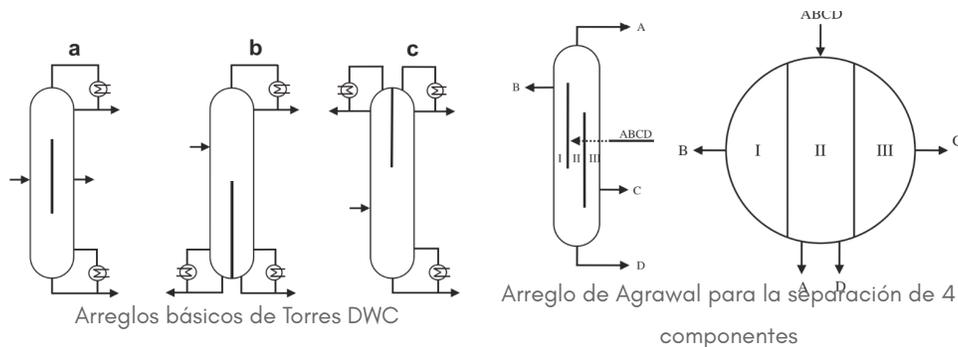


Figura 2.4 Arreglos de columnas de pared dividida [8]

Se utilizan actualmente por la empresa Aral Aromatics para la separación de tolueno y no aromáticos con N-formil-morfolina y también por BASF para separar el crudo butadieno de un crudo C4 utilizando N-metil-pirrolodina. Otras empresas que también utilizan este tipo de columnas son ExxonMobil, CEPSA, Coryton entre otras. [8]

2.7 Optimización

La optimización es una de las herramientas más poderosas en la integración de procesos e involucra la selección de la “mejor” solución entre un grupo de soluciones.

2.7.1 Elementos de la optimización

La optimización es una herramienta importante para el análisis de sistemas y en la toma de decisiones, busca encontrar la “mejor” solución dentro de un conjunto de soluciones. [15,26]

Función objetivo. – Proporciona una medida escalar del desempeño cuantitativo que necesita ser maximizado o minimizado. Esta puede ser el costo, el rendimiento, las ganancias de un proceso, etc.

Modelo predictivo. – Es un conjunto de ecuaciones y desigualdades llamadas restricciones que constituyen una región factible. Se requiere un modelo descriptivo para predecir el comportamiento del sistema.

Región factible. – Esta constituida por los límites del sistema. Dentro de esta región se encuentra toda solución factible.

Restricciones. – Existen dos tipos de restricciones las cuales están representadas matemáticamente como expresiones de igualdad y desigualdad. En un proceso químico podemos encontrar las restricciones de igualdad en los balances de materia y energía. Por otro lado, las restricciones de desigualdad las podemos encontrar en la parte ambiental, técnica o termodinámica. Por ejemplo: cuando se realiza un proceso se deben obtener niveles debajo de una cantidad determinada de contaminantes. La presión, temperatura o flujo no deben exceder ciertos valores. Se debe buscar que el sistema no viole la segunda ley de la termodinámica.

2.7.2 Problema de optimización

La optimización tiene una amplia gama de aplicaciones en la ingeniería química. Este campo a menudo tiene muchas alternativas de soluciones con complejas interacciones económicas y de rendimiento, por lo que a menudo no es fácil identificar la solución óptima a través del razonamiento intuitivo. Encontrar soluciones óptimas se puede reflejar en grandes ahorros, y rendimientos más grandes para diferentes sistemas.

El problema general de optimización sujeto a restricciones se representa de la siguiente manera.

$$\min(\text{o max}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \dots \text{función objetivo}$$

$$g_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad \dots \text{restricción de desigualdad}$$

$$h_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad \dots \text{restricción de igualdad}$$

Para este trabajo el problema de optimización así como sus restricciones se muestran en la sección 3.7.

2.7.2 Clasificación y solución de los problemas de optimización

Los problemas que surgen en ingeniería química pueden ser clasificados en términos de sus variables: continuas y discretas.

Los problemas que contienen variables discretas pueden ser resueltos mediante programación entera mixta. La cual a su vez está constituida por programación entera (PE), programación entera mixta lineal (PEML), Programación entera mixta no lineal (PEMNL). Por otro lado, las variables continuas se clasifican en diferenciables y no diferenciables. Dentro de las diferenciables se encuentran las ecuaciones convexas y no convexas. Las variables convexas pueden ser resueltas mediante métodos de programación lineal (PL) o programación cuadrática (PC) [19]. El presente trabajo se resolvió mediante Programación Cuadrática Secuencial (SQP), la cual pertenece a la programación cuadrática (PC) para problemas convexas y diferenciables.

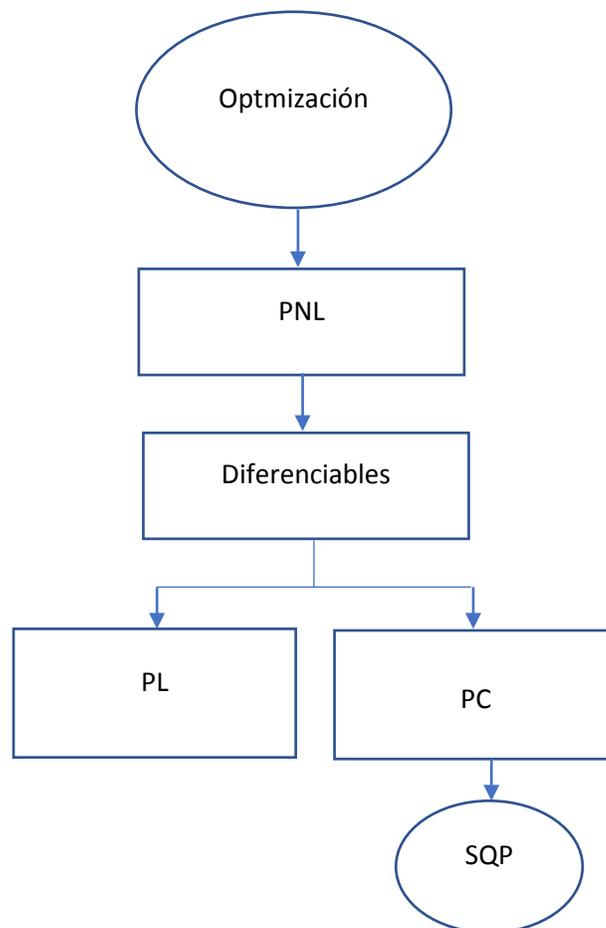


Figura 2.5 Clasificación de la programación en optimización (adaptado de [19])

2.7.3 Optimización multiobjetivo

La optimización multiobjetivo es una parte integral de las actividades de optimización y ha sido de gran importancia, debido a que casi todos los problemas de optimización del mundo real se modelan utilizando funciones objetivo contradictorias [17,18].

El problema general de optimización multiobjetivo se representa de la siguiente manera:

$$\min \omega(x,u) = [\omega_1(x,u), \omega_2(x,u) \dots \omega_k(x,u)]$$

Sujeto a:

$$dx/dt = f(x,u) \text{ con condiciones iniciales } t=t_0, x=x_0$$

$$h(x,u) = 0 \text{ restricciones de igualdad}$$

$$g(x,u) \leq 0 \text{ restricciones de desigualdad}$$

La optimización multiobjetivo a comparación de la uniobjetivo, presenta un grupo de soluciones óptimas conocidas como soluciones de Pareto, las cuales se encuentran acotadas por la región factible y están representadas gráficamente en la frontera de Pareto como se muestra en la fig. 2.6 [16,18].

El punto utopía es aquella solución que no se encuentra dentro de la región factible, y es considerado como el mejor escenario. Cuando se define la mejor solución, el punto más cercano de la frontera de Pareto a este será considerado como el punto óptimo. Por otro lado, la optimización se puede llevar a cabo determinando el peor escenario, en este caso el punto óptimo será aquel que se encuentre más alejado.

El punto utopía cumple las siguientes condiciones matemáticas:

$$\min \omega_k(x)$$

$$s. a \quad \frac{dx}{dt} = f(x,u), h(x) = 0$$

$$g \leq 0, x_{lb} < x < x_{ub}, u_{lb} < u < u_{ub}$$

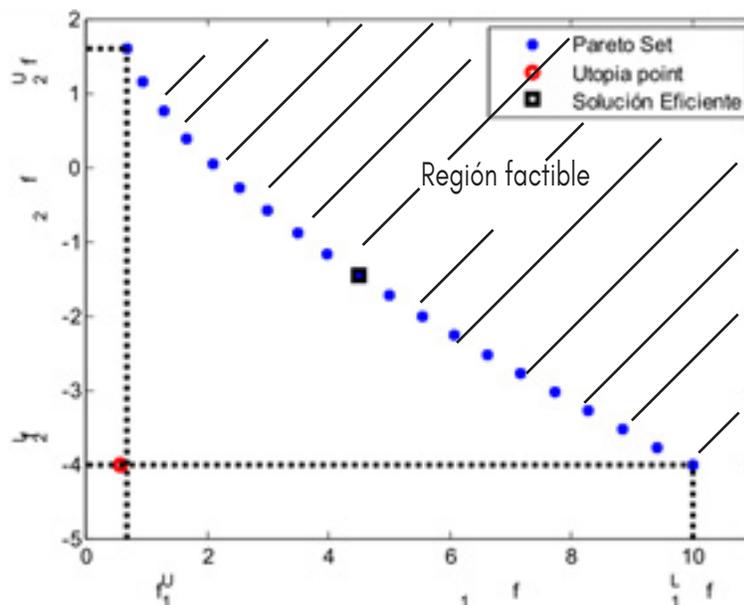


Figura 2.6 Frontera de Pareto (adaptado de [18])

2.7.4 Técnicas de optimización multiobjetivo

Existen tres métodos generales que se utilizan para la optimización multiobjetivo:

- Métodos progresivos. – Integra la búsqueda con la toma de decisiones. El usuario tiene participación durante el proceso de solución del problema.
- Métodos a priori. – Se toman decisiones antes de la búsqueda. Es decir; el usuario especifica sus preferencias expectativas y opiniones antes de la búsqueda.
- Métodos posteriori. – Buscar antes de tomar decisiones. Después de encontrar el conjunto de óptimos de Pareto, el usuario selecciona las mejores alternativas de acuerdo con su criterio. Están clasificados en suma de pesos, épsilon restringida e intersección normal límite. [18]

2.8 Aspen Plus

Aspen Plus™ es un software de simulación desarrollado en 1970 por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). Este software ha sido comercializado por la compañía Aspen Tech® desde 1980.

Aspen Plus™ es un programa de simulación de procesos químicos, en el cual además de simulaciones de diagramas de flujo, puede realizar:

1. Estimación de propiedades de compuestos.
2. Análisis de sensibilidad de variables de proceso.
3. Especificaciones de diseño de proceso.
4. Síntesis y análisis de procesos químicos, entre otras tareas del diseño de procesos y equipos.

Además cuenta con un apartado que permite optimizar una función objetivo mediante programación cuadrática secuencial, debido a esto, dicha función es obligada ser convexa encontrando una solución y evitando que se indetermina.

Aspen Plus™ es un programa que será utilizado a lo largo de toda esta investigación [20].

2.9 Sustentabilidad

Actualmente ha habido mayor interés en el desarrollo de recursos renovables con la finalidad de combatir las altas emisiones de CO₂ y de esta forma evitar el cambio climático. Las fluctuaciones e incrementos en el precio del gas y el petróleo han aumentado el interés en alternativas que utilicen bajas o nulas cantidades de carbono como recurso energético. Debido a estos costos y a la preocupación ambiental, el sector industrial se ha visto en la necesidad de mejorar su eficiencia energética. Por otro lado, el abastecimiento doméstico ha mejorado e implementando procesos que utilizan energías renovables como el calentamiento solar, bombas solares, turbinas de viento, entre otras.

La producción industrial requiere cantidades considerables y continuas de energía derivada de recursos naturales, principalmente de combustibles fósiles como el carbono, crudo y gas natural. El crecimiento de la población y el aumento de la demanda de alimento ha llevado a un incremento de consumo de energía y otros problemas como condiciones inestables en el clima y el ambiente debido a la alta carga de CO_2 , NO_x , SO_x , polvo, carbón negro y desechos de combustión. Por lo tanto, se ha convertido en un aspecto importante tomar ventaja de los avances en la eficiencia energética.

A pesar de la alta cantidad de energía utilizada en la industria, este no es el único sector que ha tenido un aumento en su consumo. Existen otros como el residencial y el de transportes en los cuales se vuelve aún más complicada la optimización energética. [27]

La integración de la sustentabilidad al diseño de procesos contribuye a la prevención y/o minimización de circunstancias negativas, lo cual permite evitar realizar modificaciones correctivas y costosas. [11] Debido a esto se vuelve indispensable cuantificar la cantidad de energía utilizada ya que el buen diseño procesos puede llevar a resultados favorables como la disminución de costos y daños al medio ambiente.

Bruntland en 1987 [30] define a la sustentabilidad como “ la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. La sustentabilidad se basa en tres escenarios de acción: económica, ambiental y social.

2.9.1 Índices de sustentabilidad

Los índices de sustentabilidad permiten cuantificar la cantidad de daño ambiental, de materia prima, energía y costo utilizado para el proceso [11]. De esta manera es posible comparar de manera cuantitativa cada una de las destilaciones utilizadas en este trabajo, es por ello que se recurrió a su uso.

A pesar de que existe una gran cantidad de índices de sustentabilidad. Debido a los datos que nos permitía obtener Aspen PlusTM se decidió recurrir a los siguientes:

1. Potencial de Calentamiento global:

$$GWP = \frac{\text{Masa total de } \text{CO}_2}{\text{Masa de producto}} \dots (\text{Ec. 2.1})$$

2. Intensidad de masa:

$$MI = \frac{\text{Masa de entrada}}{\text{Masa de producto}} \dots (\text{Ec. 2.2})$$

3. Intensidad de energía específica :

$$R_{SEI} = \frac{\text{Energía neta utilizada}}{\text{Masa de producto}} \dots (\text{Ec. 2.3})$$

4. Costo capital

$$C_{TM} = \text{Costo directo} + \text{Costo Indirecto} + \text{Capital de trabajo} \dots (\text{Ec. 2.4})$$

5. Conversión de reactivo en producto:

$$Y = \frac{\text{Masa de producto}}{\text{Masa de entrada}} \dots (\text{Ec. 2.5})$$

La diferencia entre el rendimiento, la conversión y la productividad de masa se debe a la cuantificación de cada uno de ellos. Por ejemplo: el rendimiento se define como el cociente de moles de producto obtenidos entre la cantidad máxima de producto que se debió de haber obtenido teóricamente. La conversión tradicional toma en cuenta la relación de reactivo consumido y el reactivo alimentado considerando sus coeficientes estequiométricos, mientras que la productividad de masa o en este caso llamado conversión engloba la relación que existe entre los kilogramos de producto obtenido y los kilogramos alimentados.

CAPÍTULO

3

METODOLOGÍA

El presente capítulo aborda todos los pasos que se siguieron para la realización de este trabajo. Muestra la caracterización del aceite comercial la cual posteriormente fue comparada con el aceite obtenido en el capítulo 4. Proporciona las ecuaciones utilizadas para el cálculo de propiedades termodinámicas, y algunos otros cálculos como el porcentaje de error. Presenta los parámetros de diseño que se siguieron para el problema de simulación y la forma en que estos datos fueron ingresados al programa Aspen Plus™.

3.1 Selección de aceite usado

Tres aceites gastados fueron utilizados para la elaboración de este proyecto. El Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) proporcionó una caracterización de estos aceites, basada en el porcentaje de destilado contra su temperatura. A continuación, se muestran la caracterización de estos aceites:

Porcentaje de destilado [%]	Temperatura [°C] Aceite 1	Temperatura [°C] Aceite 2	Temperatura [°C] Aceite 3
0	105.9	102	137.8
5	156.2	178	210.5
10	176.6	221	261.7
15	192.7	260.3	308
20	204.6	298.8	354
25	214.4	338.4	378.3
30	228.7	365.8	393.5
35	240.9	382.5	405.2
40	252.7	394.2	415.4
45	266.8	403.9	424.6
50	280.5	412.5	433.3
55	295.4	420.3	442
60	317.4	427.7	450.6
65	346.8	435	459.1
70	373.2	442.1	467.8
75	395.4	449.4	476.7
80	414.2	456.5	485.5
85	431.5	463.7	494.4
90	448.3	471	503.1
95	465	478.5	511.8
100	479.4	485.3	519.7

Tabla 3.1 Caracterización de aceite 1,2 y 3. Proporcionado por el Instituto Mexicano del Petróleo

3.1 Ingreso de la alimentación al programa de simulación

La tabla 3.1 muestra la caracterización del aceite gastado. Para ingresar estos parámetros en Aspen Plus es necesario ingresarlos como una *assay table*. Los pasos para ingresar estos datos al problema se muestran en la figura 3.1

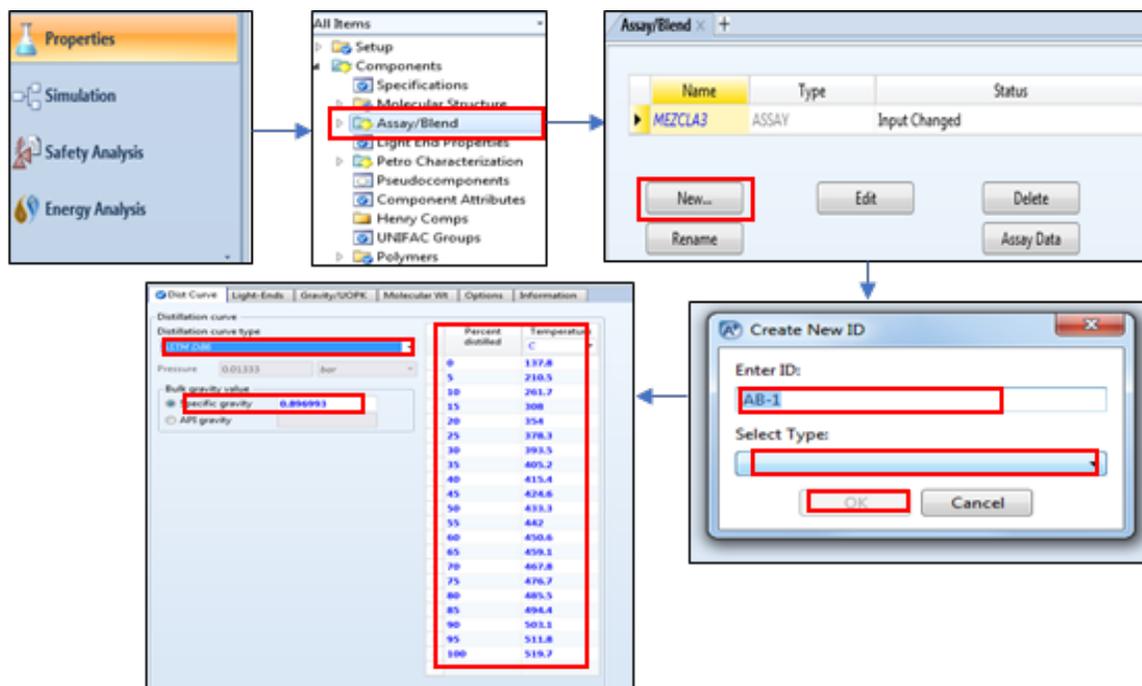


Figura 3.1 Ingreso de datos de alimentación al problema de simulación

3.2 Propiedades fisicoquímicas de los aceites usados

Se determinaron propiedades como: peso molecular promedio, peso específico, densidad, punto de inflamabilidad, y la gráfica porcentaje de destilado contra temperatura mediante el método ASTM1160 en Aspen Plus™. En la figura 3.1 se muestran los pasos para obtener estos parámetros.

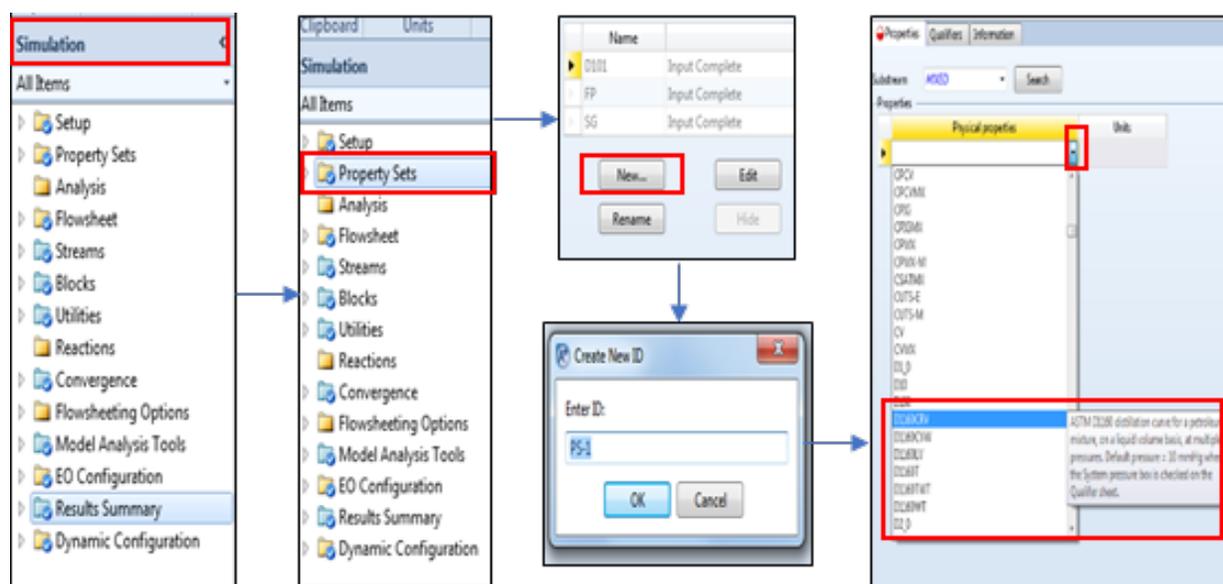


Figura 3.2 Metodología para la obtención de propiedades fisicoquímicas

3.2.1 Propiedades termodinámicas de los aceites usados

Aspen Plus™ es capaz de calcular todas las propiedades termodinámicas, pero primero se debe determinar una ecuación de estado apropiada para el producto que se está manejando, en este caso hidrocarburos.

La decisión de la ecuación de estado se basó en una tabla que Aspen Plus™ provee en el manual del usuario [21] para la determinación de propiedades termodinámicas (fig. 3.2).

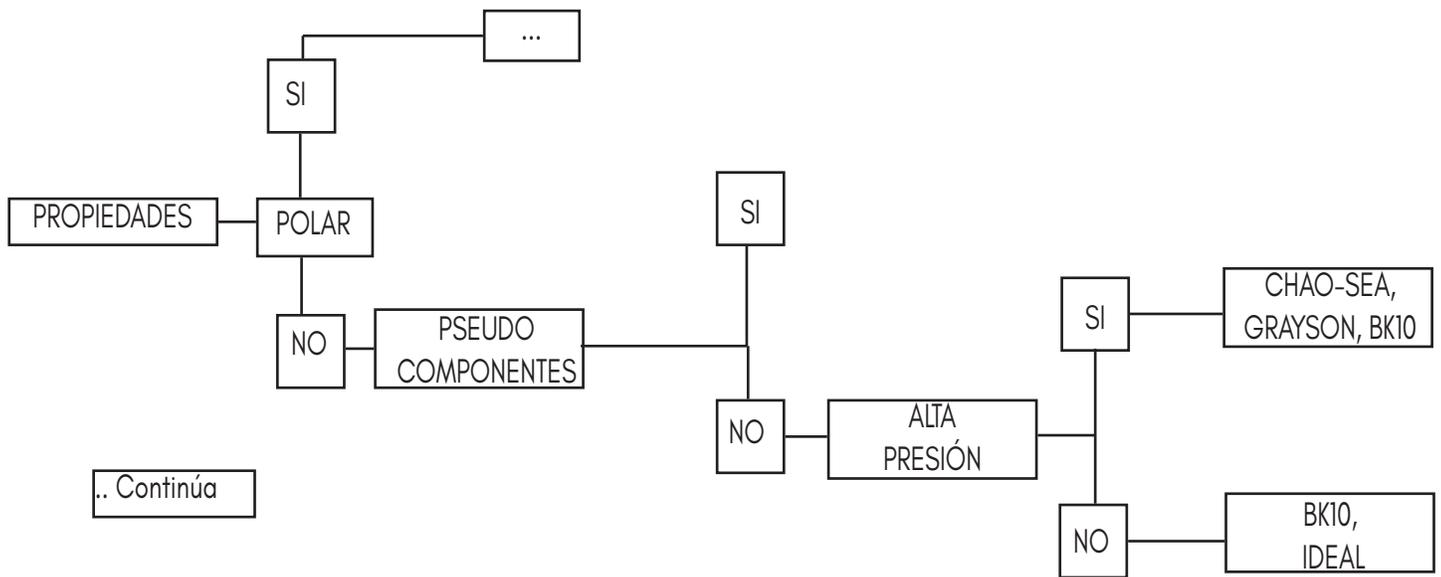


Figura 3.3 Diagrama de decisión para métodos termodinámicos [adaptado de 21]

Posteriormente esta ecuación fue integrada al programa de simulación para que este pudiera calcular las propiedades correspondientes: presión, temperatura, densidad, etc.

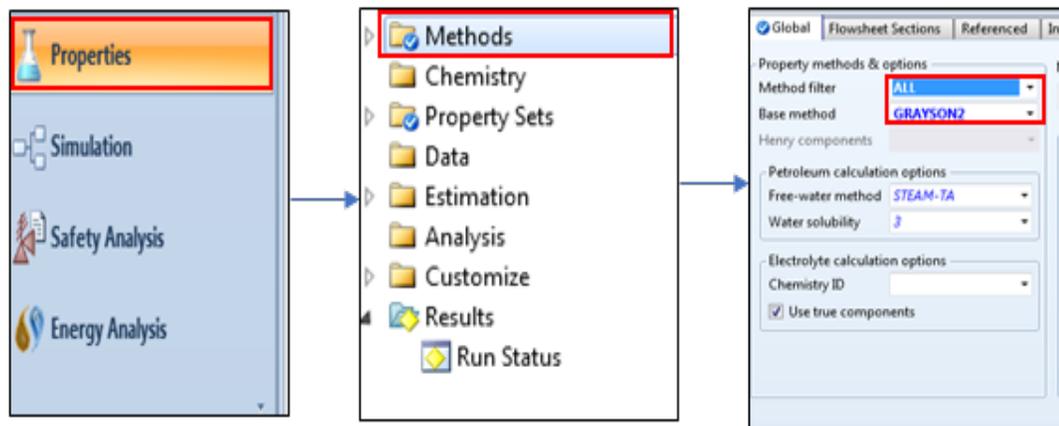


Figura 3.4 Ingreso de ecuación termodinámica al programa de simulación

3.3 Caracterización del aceite virgen

El Instituto Mexicano del Petróleo realizó una caracterización de su aceite virgen, la cual fue utilizada para comparar resultados entre el aceite comercial y el producto obtenido por medio de la simulación. De esta manera se verificó si el aceite al final del proceso se encontraba en condiciones para ser reutilizado.

Porcentaje de destilado (%V)	Aceite Husos [°C]	Aceite Tecnol [°C]	Aceite Neutro Ligero [°C]	Aceite Neutro [°C]	Aceite Neutro Pesado [°C]
TIE	297/315	336	347	363/372	429/435
10	351/356	387	408	426/439	476/500
30	363/376	401	428	455/460	534/537
50	374/395	411	444	470/473	577/579
70	383/406	419	455	483/485	600/607
90	398/423	429	467	492/498	620/624
TFE	404/429	440	473	510/516	625/628

Tabla 3.2 Cortes del aceite virgen proporcionados por el IMP

Lubricantes Pruebas	Método ASTM	HUSOS	TECNOL	NEUTRO LIGERO	NEUTRO	NEUTRO PESADO
1. Peso Específico @ 20/4°C	D-1298	0.883	0.891	0.898	0.906	0.901
2. Temperatura de Inflamación °C	D-1310	145 min	180 min	200 min	215 min	250 min
3. Peso Molecular (g/gmol)	D-2502	325/340	365	405	440	540

Tabla 3.3 Caracterización de aceites proporcionados por el IMP

3.4 Diseño del proceso de torres de destilación ordinaria para el reciclaje de aceites usados

Debido a que este proceso es una destilación multicomponente, se utilizaron torres de destilación en serie para llevar esta separación. Se realizó una aproximación de los parámetros de operación que debían cumplir las torres de destilación mediante métodos cortos de cálculo como SCFrac. Una vez obtenidos los parámetros de esta torre se cambió a un método riguroso (Radfrac) para obtener estimaciones reales del proceso.

3.4.1 Diseño de torres en serie

La simulación se llevó a cabo para los tres aceites gastados en torres de destilación en serie para obtener tres productos; es decir, dos productos más, además del producto de interés. Esto con la

finalidad de subir la rentabilidad del proceso.

Existen dos secuencias de separación para los tres componentes que se desean obtener (Thompson, King (1972)). Utilizando las reglas heurísticas de Nadgir y Liu (1983) se decidió separar el componente más abundante primero (Aceite Neutro Ligero, (B) figura 3.5) y posteriormente aquellos que tienen una separación más difícil (sustitutos de combustibles, (D2, B2) figura 3.5).

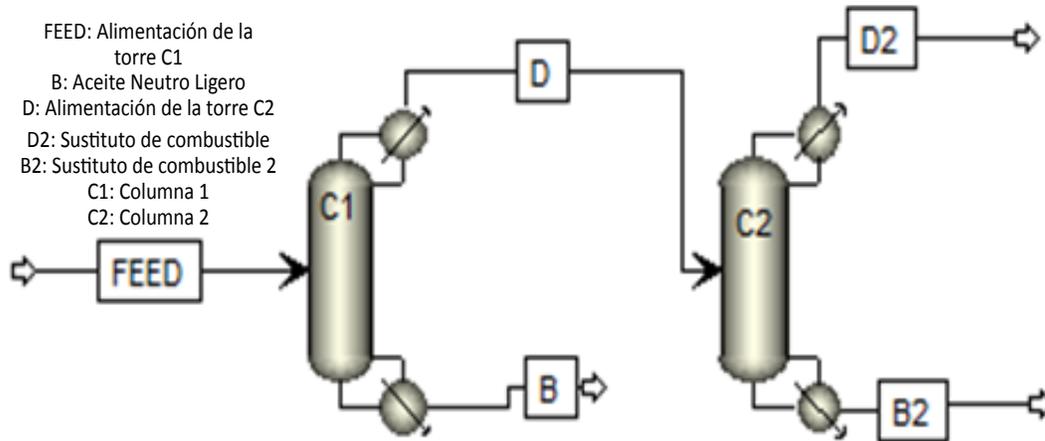


Figura 3.5 Diagrama de simulación de torres en serie

3.4.2 Ingreso de parámetros para torres de destilación en serie

Para que Aspen Plus™ pueda obtener los cálculos correspondientes es necesario brindar ciertos valores. En este caso en particular se brindan datos para la corriente de alimentación (FEED) y datos de operación para la columna 1 y 2 (C1, C2) (fig. 3.5)

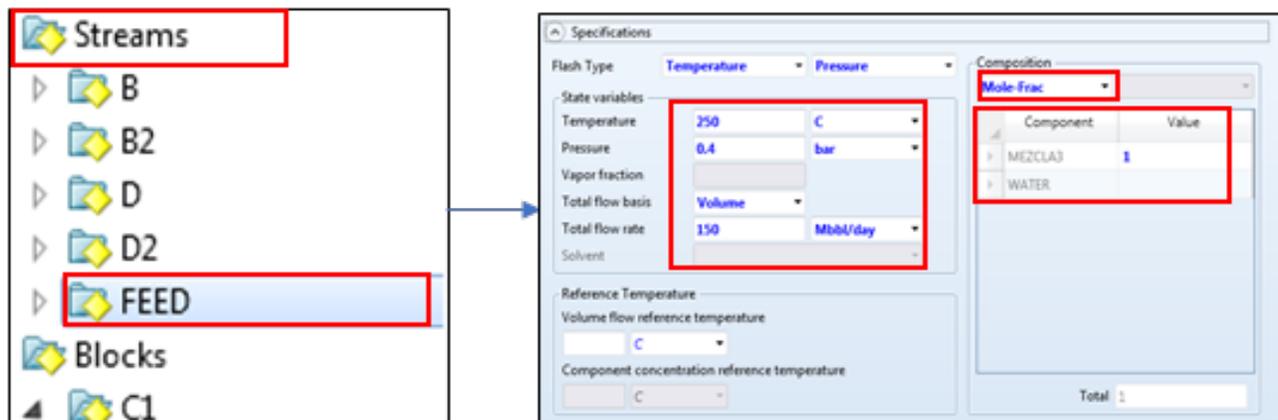


Figura 3.6 Ingreso de datos a la corriente de alimentación

La figura 3.6 y 3.7 muestran una serie de pasos a seguir para el ingreso de datos de estas torres.

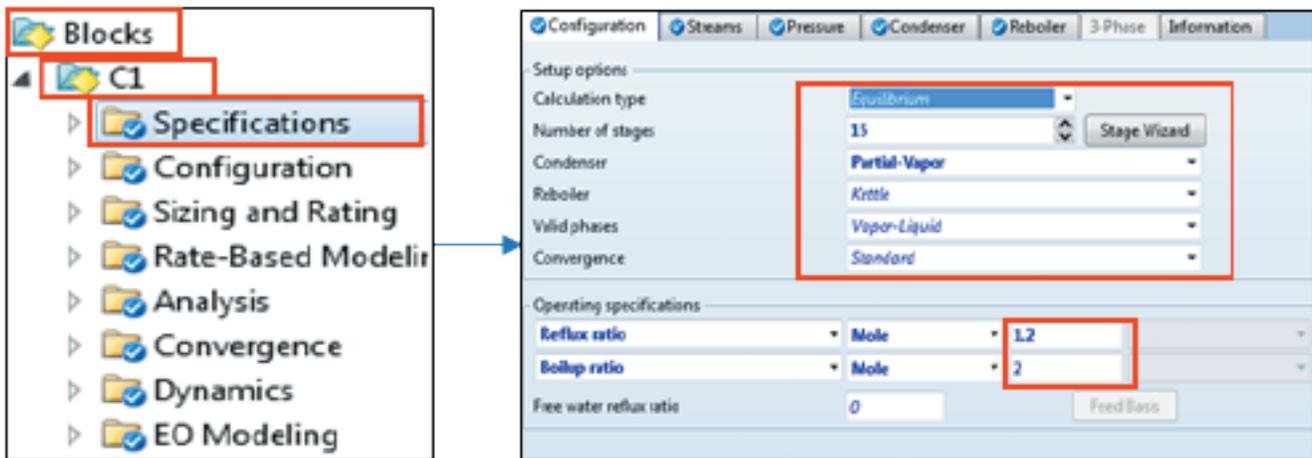


Figura 3.7 Ingreso de parámetros para la columna C1 y C2

3.5 Diseño de torres de destilación tipo Petlyuk

Una vez obtenida la aproximación con el método corto SCFracc. Se diseñó una torre de destilación tipo Petlyuk, la cual consistía en un precalentador y una torre de destilación ordinaria con una salida lateral (fig. 3.8).

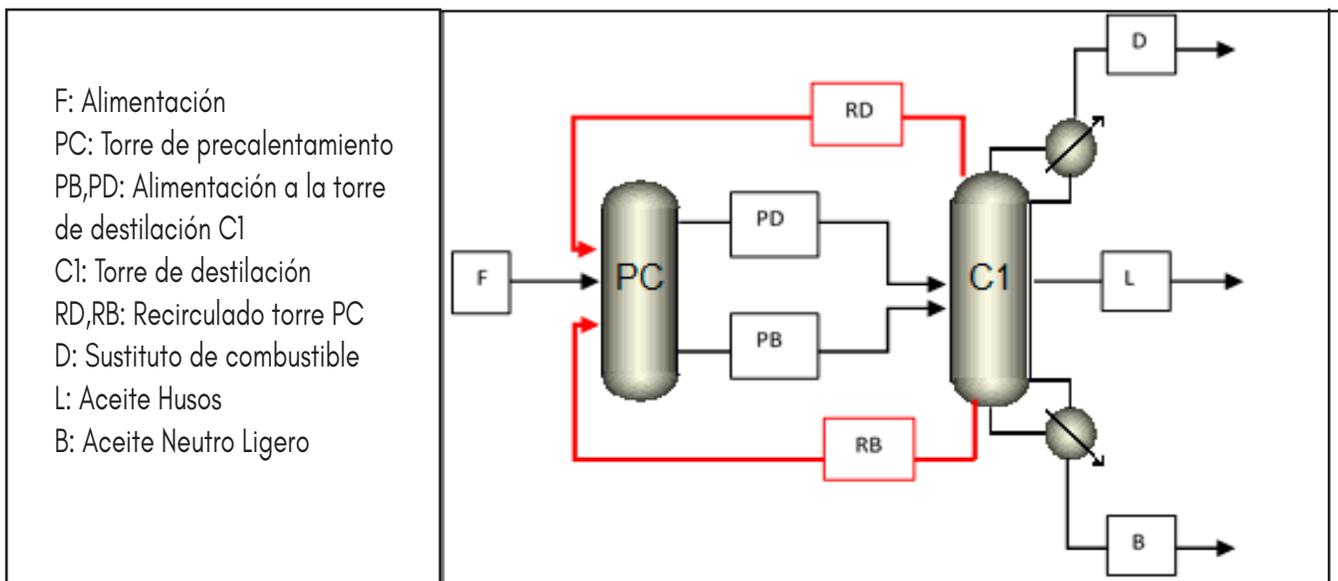


Figura 3.8 Diagrama de simulación de la destilación tipo Petlyuk

3.5.1 Ingreso de datos en el proceso de destilación Petlyuk

Al igual que para la sección 3.4, el ingreso de datos del proceso Petlyuk siguieron los pasos que se muestran en la figura 3.6 y 3.7. Por otro lado, al ingresar los parámetros de operación para el precalentador (PC, fig. 3.8) se utilizó una columna sin condensador. Lo cual fue especificado en Aspen Plus™ (fig. 3.9).

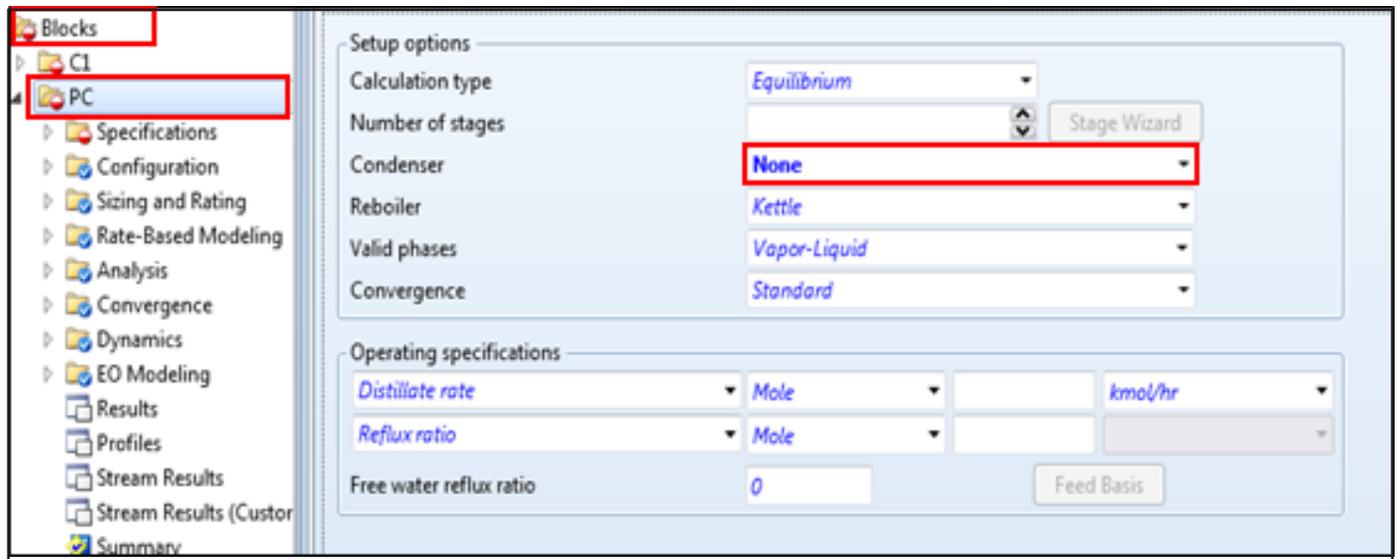


Figura 3.9 Ingreso de columna sin condensador

3.5.2 Plato de alimentación de las corrientes de recirculación

Se determinó el plato de alimentación de las corrientes de recirculación (RD, RB, Fig. 3.8), de manera empírica. Se fue variando el plato de entrada y salida. Al obtener la mayor cantidad del producto de interés B (fig. 3.8) se determinó que esa era la mejor opción para este proceso.

3.6 Diseño de torre de destilación de pared dividida (DWC)

Aspen Plus no cuenta con la configuración DWC, por lo tanto, se realizó un diseño para simular este tipo de columna. Se utilizaron tres columnas diferentes. La primera solo contaba con un rehervidor, esta columna simulaba los fondos y parte de la columna principal. La segunda columna carecía de rehervidor y condensador, representando la pared que divide la columna. La tercera solo contenía un condensador y simulaba el destilado de la torre (Fig. 3.10).

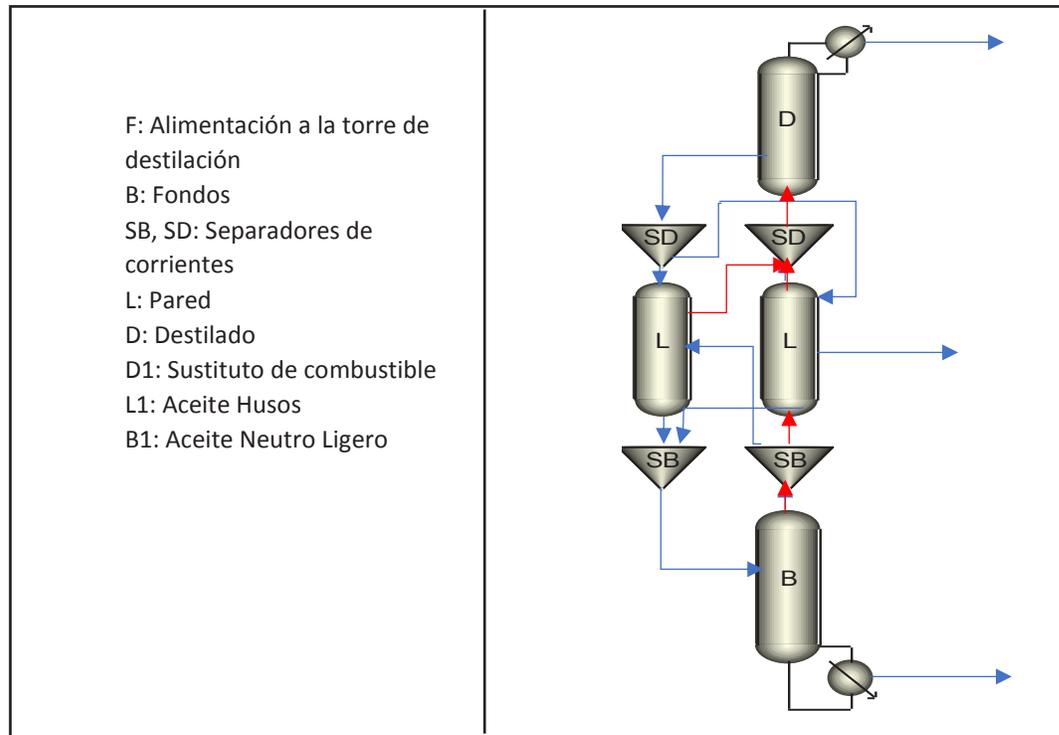


Figura 3. 10 Diagrama de simulación para el proceso DWC

3.6.1 Ingreso de datos para la destilación de pared dividida (DWC)

La misma metodología se sigue para el ingreso de datos que para los casos anteriores (3.4.2, 3.5.1). Sin embargo, ahora se deben especificar la columna L y D (Fig. 3.1). El ingreso de este tipo de columna se muestra en la figura 3.12 y 3.13.

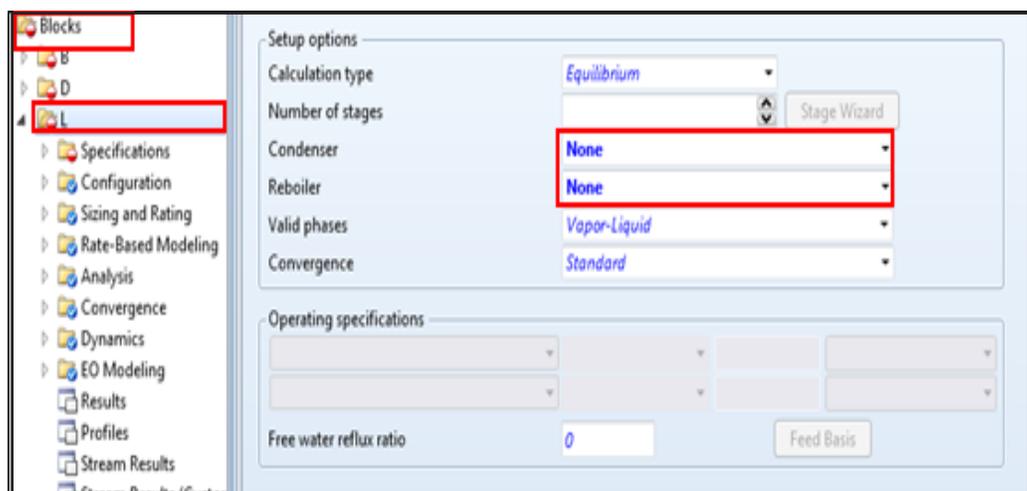


Figura 3.12 Ingreso de datos para torre de destilación sin rehervidor, ni condensador

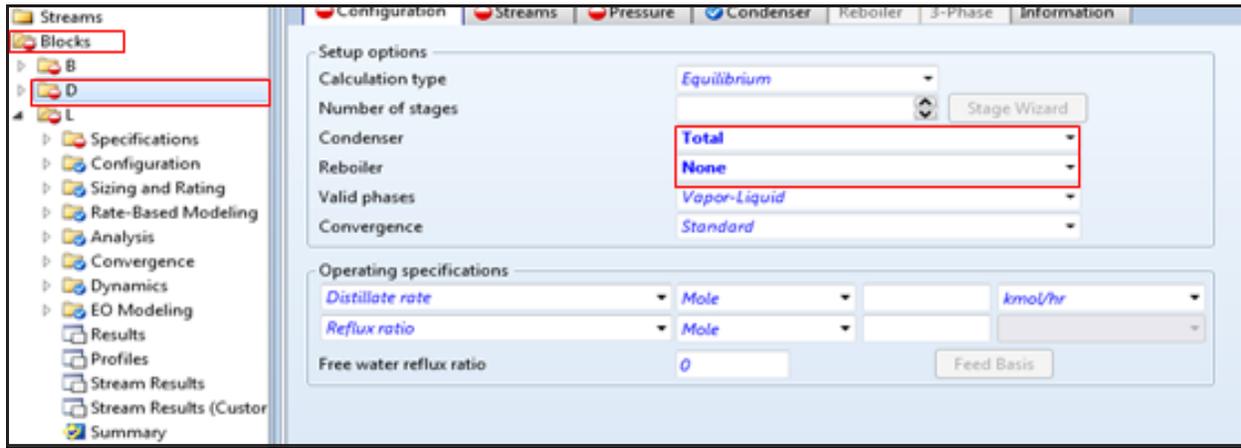


Figura 3.13 Ingreso de datos para torre de destilación sin rehervidor

3.7 Optimización

La optimización llevada a cabo fue la misma para los tres casos (destilación ordinaria, Petlyuk, DWC). La función objetivo se definió como la parte energética (minimización de energía en el sistema). Por otro lado, la restricción del sistema se definió como la cantidad de producto obtenido (Aceite Neutro Ligero). El problema se restringió con diferentes cantidades de aceite que podían ser obtenidos para tener un conjunto de soluciones. Debido a que este problema se manejaba en cortes no fue posible agregar una restricción en la calidad del aceite, por lo cual en cada corrida se determinaba si el aceite obtenido era candidato a una solución. La solución óptima fue aquella que cumplía con los parámetros de calidad, cantidad de energía y máxima conversión; es decir, aquella que estaba más cercana al punto utopía.

$$f_{do}(x) = QC_{C1} + QC_{C2} + QR_{C1} + QR_{C2} \dots (Ec. 3.1)$$

donde : QC_{C1} = Calor del condensador en la columna 1

QC_{C2} = Calor del condensador en la columna 2

QR_{C1} = Calor del rehervidor en la columna 1

QR_{C2} = Calor del rehervidor en la columna 2

$$f_{PL}(x) = QC_{C2} + QR_P + QR_{C2} \dots (Ec. 3.2)$$

donde : QC_{C2} = Calor del condensador en la columna 2

QR_P = Calor del rehervidor en el precalentador

QR_{C2} = Calor del rehervidor en la columna 2

$$f_{DWC}(x) = QC_{C1} + QR_{C1} \dots (Ec. 3.3)$$

donde : QC_{C1} = Calor del condensador en la columna 1

QR_{C1} = Calor del rehervidor en la columna

$$\text{sujeto a } g(x) = \frac{F_{S_p}}{F_e} \dots (Ec. 3.4)$$

F_{S_p} = Flujo de salida del producto de interes

F_e = Flujo de entrada o alimentación

La ecuación 3.1, 3.2 y 3.3 representan las funciones objetivo de cada una de las configuraciones: ordinaria, Petlyuk y DWC respectivamente. Todas las configuraciones estuvieron sujetas a la misma restricción de igualdad (Ec. 3.4), la cual se refiere a la conversión obtenida en el sistema.

Las variables manipuladas para todos los casos fueron: La temperatura de alimentación, la relación de reflujo en el fondo y en el destilado. La temperatura de alimentación se definió con el propósito de que todo el proceso no superara los 500°C, ya que esto brinda problemas de degradación en los aceites. Por otra parte, la razón de reflujo en el fondo y en el destilado fueron limitados de 1 a 5, ya que en los procesos industriales 5 es la relación de destilado máxima utilizada [4].

3.7.1 Ingreso de datos de optimización al simulador Aspen Plus

A continuación, se muestra la secuencia que se siguió para ingresar los datos de optimización a Aspen Plus:

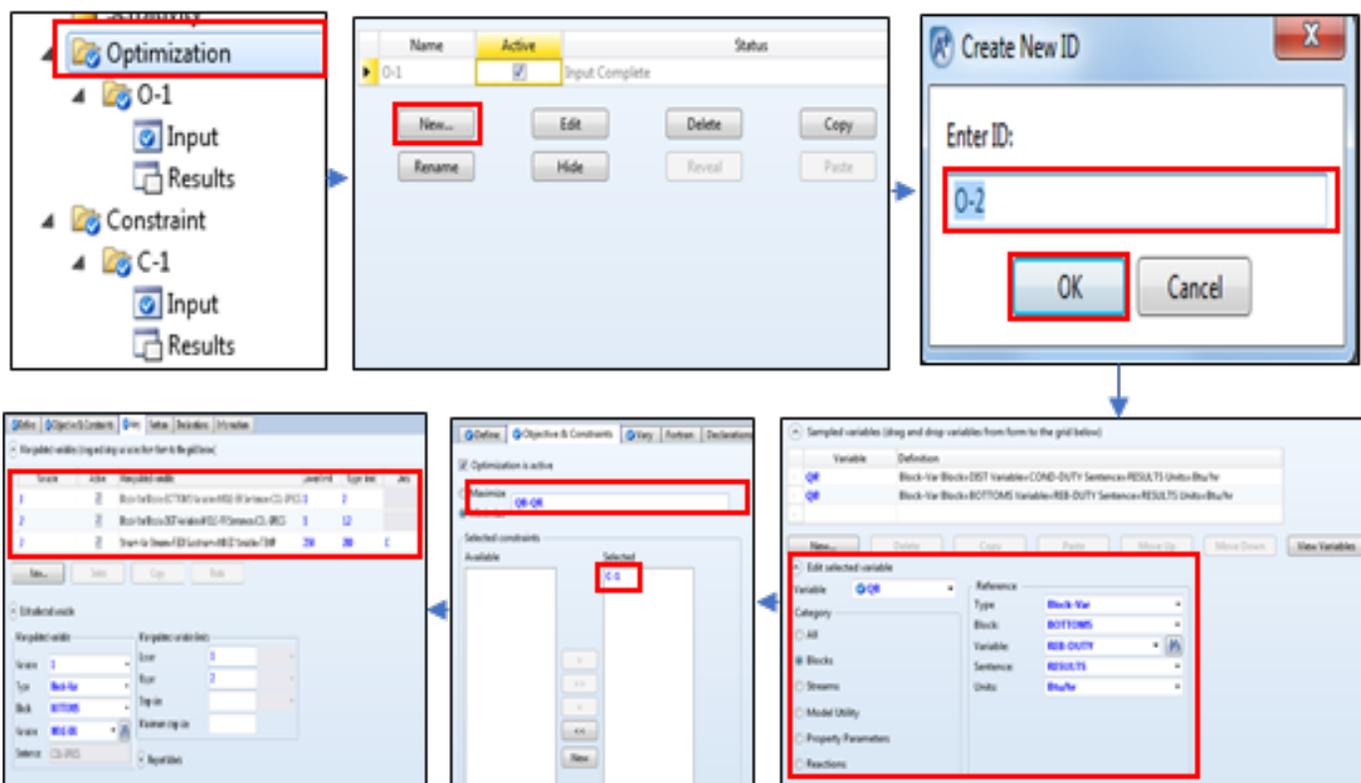


Figura 3.14 Ingreso de datos de optimización

3.7.1 Aceites candidatos a solución factible

Se hizo una comparación entre el aceite obtenido en Aspen Plus después de la optimización y la caracterización del aceite brindado por el Instituto Mexicano del Petróleo. El error para el corte y para las propiedades fisicoquímicas fueron calculadas como se muestran en la ecuación 3.4 y 3.5 respectivamente. Los aceites candidatos a solución a solución no superaban el 5 % de error en el corte.

$$\%Error_{CORTE} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_{AS} E_{AS})}{\sum_{i=1}^n x_{AC}} * 100 \dots (Ec. 3.4)$$

x_{AS} : Valor del aceite simulado

E_{AS} : Error del aceite simulado

x_{AC} : Valor del aceite comercial

$$\%Error_{pfq} = \frac{P_{AS} - P_{AC}}{P_{AS}} \dots (Ec. 3.5)$$

P_{AC} : Valor del aceite comercial

P_{AS} : Valor del aceite simulado

3.8 Frontera de Pareto

Para construir la frontera de Pareto se corrieron diferentes escenarios para los tres aceites y las tres configuraciones. Se varió la restricción desde la más baja hasta la más alta alcanzable, incluyendo puntos intermedios. Las variables manipuladas permanecieron con el mismo valor. Se determinó la distancia de cada punto en la frontera de Pareto al punto utopía y se estableció como punto óptimo aquel que tenía la menor distancia y cumplía los parámetros de calidad del aceite virgen.

3.9 Evaluación económica

Se utilizó Aspen Plus para realizar la evaluación económica total del proceso.

3.10 Índices de sustentabilidad

Mediante Aspen Plus se calcularon la energía neta del sistema, el costo capital y la masa del producto. A partir de estos datos obtenidos se calcularon cinco índices de sustentabilidad (GWP , MI , R_{SEI} , C_{TM} , Y) desarrollados en la sección 2.9.1.

CAPÍTULO

4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

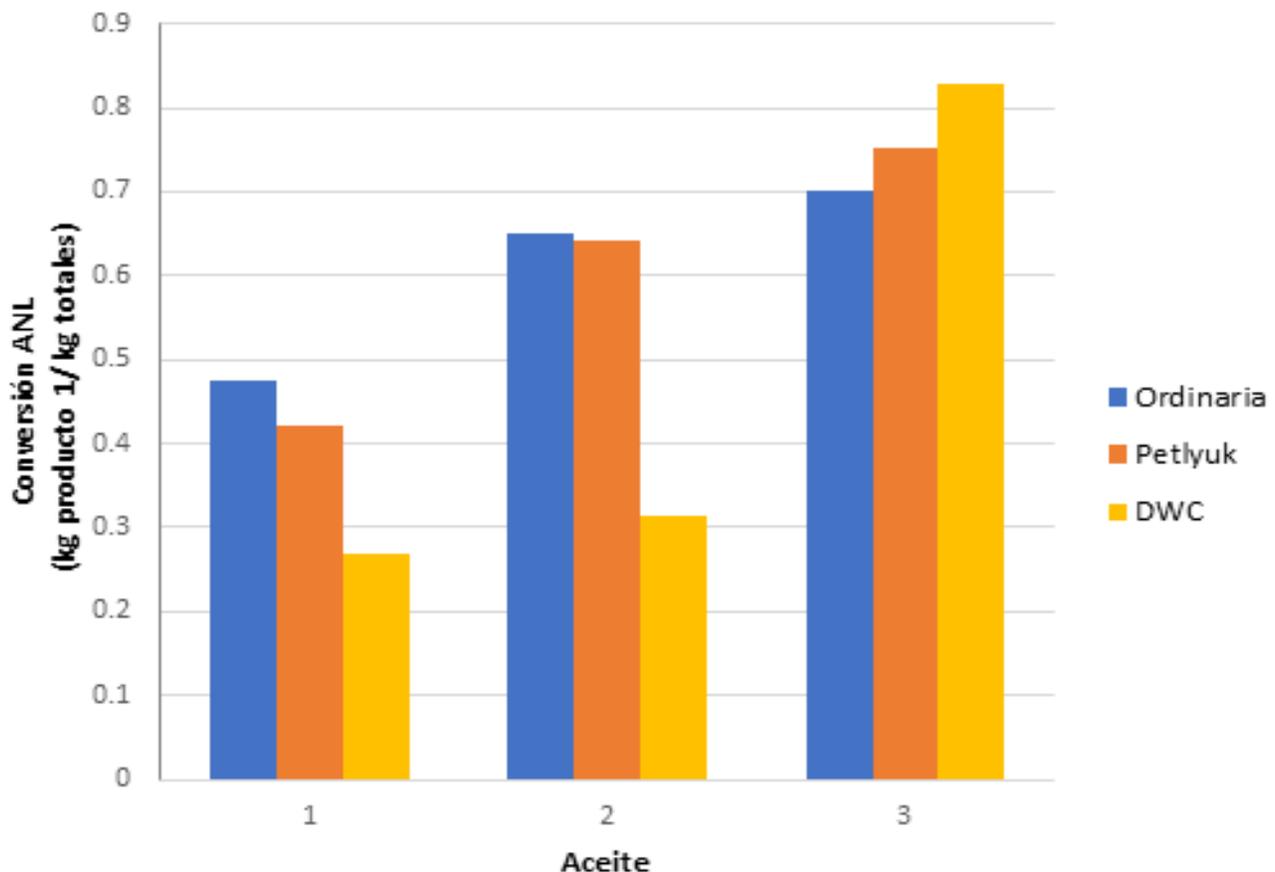
Este capítulo presenta los resultados obtenidos del trabajo de simulación. Realiza una comparación entre los puntos de operación óptimos, así como una caracterización de los aceites obtenidos en la simulación y los que se distribuyen de forma comercial. Además, se brinda una descripción breve acerca de la instalación de una planta DWC tomando en cuenta el pilar social de la sustentabilidad.

4.1 Indicadores de sustentabilidad

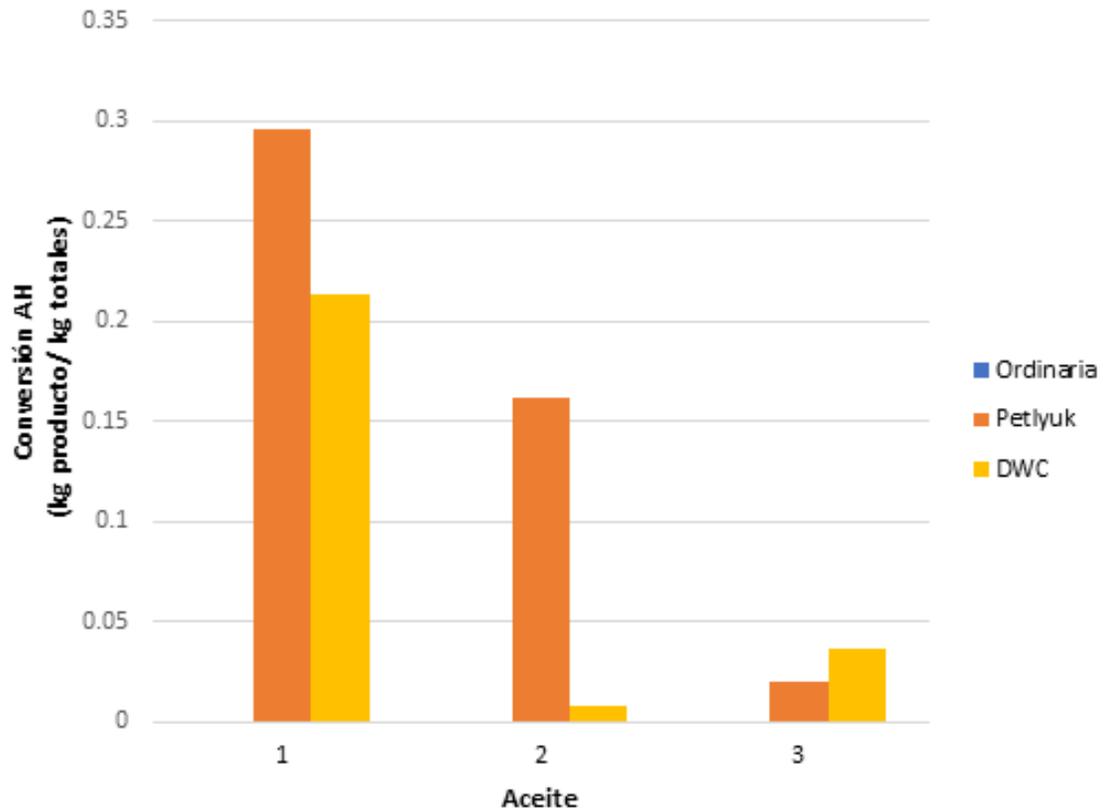
4.1.1 Intensidad de masa y conversión

Las tres configuraciones –destilación ordinaria, Petlyuk y DWC – permitieron obtener el producto de interés (aceite neutro ligero), solo Petlyuk y DWC fueron capaces de obtener aceite husos y un sustituto de combustible, además del ANL. Por otro lado, la configuración ordinaria se limitó a obtener solamente el producto de interés y dos sustitutos de combustible.

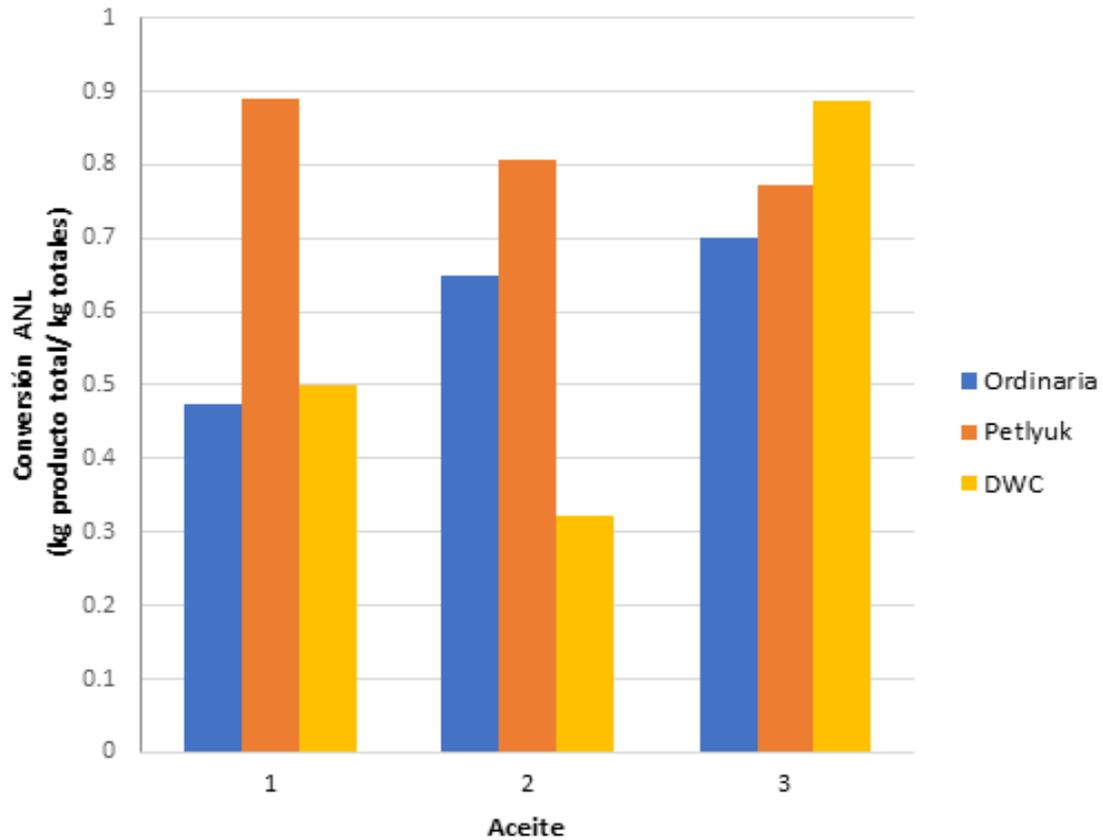
La gráfica 4.1 muestra la conversión de materia prima en aceite neutro ligero (ANL) para los tres procesos simulados. La configuración “destilación ordinaria” logró una mayor separación del ANL para el aceite 1 y 2. Para el caso uno, la destilación ordinaria superó a Petlyuk por un 5.4% y a DWC por 20.7%. En el caso dos, la destilación ordinaria separó solo un 0.8% más que Petlyuk pero superó de manera significativa a DWC con un 33.5%. La separación del aceite 3 fue favorecida por DWC superando a la destilación ordinaria y a Petlyuk por un 12.7% y 7.5%, respectivamente. La cantidad obtenida de aceite husos se muestra en la gráfica 4.2. Petlyuk resultó ser un proceso que favorece no solo al ANL, sino también la obtención de aceite husos (AH), separando 8.1% y 15.3% más que DWC para los aceites 1 y 2. Nuevamente, DWC resultó favorecer la separación del aceite 3, obteniendo 1.6% más aceite husos que Petlyuk.



Gráfica 4.1 Conversión de producto en aceite neutro ligero



Gráfica 4.2 Conversión de materia prima en aceite husos



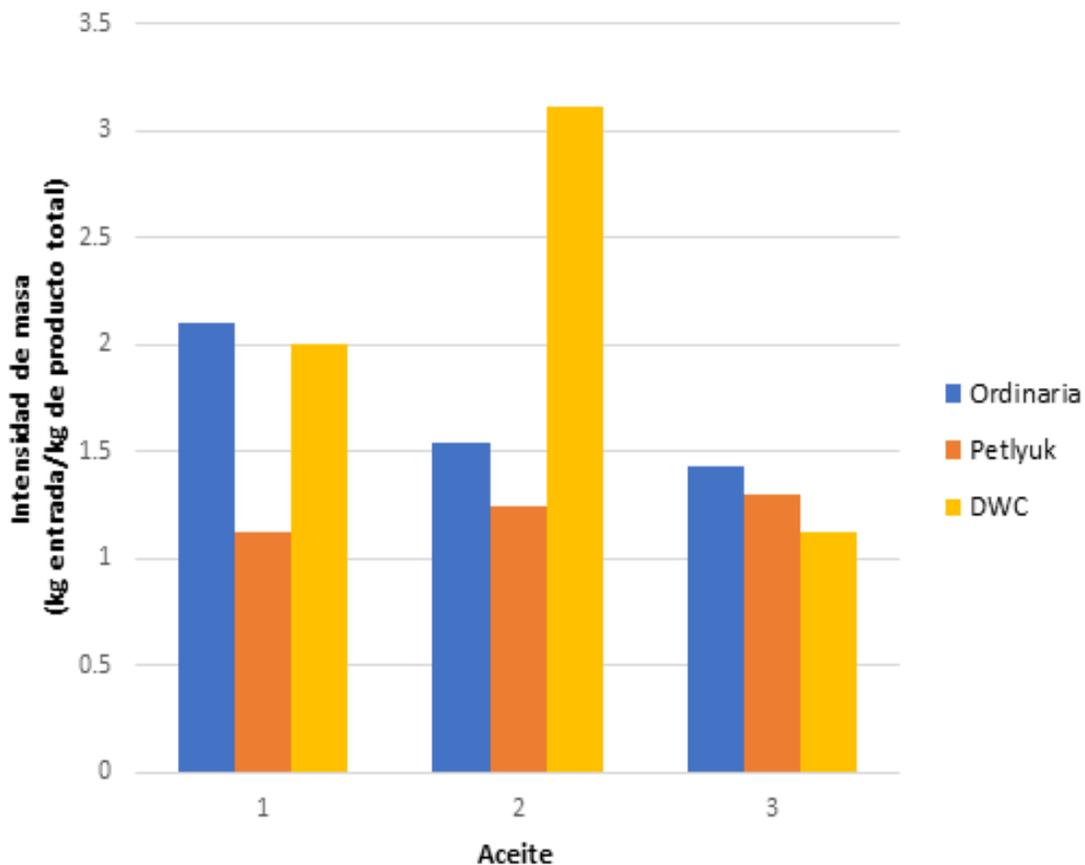
Gráfica 4.3 Conversión de producto en aceite neutro ligero y aceite husos

Por otra parte, si se toma en cuenta el total de los dos productos (ANL, AH). Se puede observar que Petlyuk es favorable para los aceites uno y dos (Gráfica 4.3). DWC a pesar de no haber obtenido tan buen desempeño como el proceso Petlyuk pudo favorecer la separación del aceite tres y superar a la configuración ordinaria en el aceite 1.

DWC y Petlyuk contienen la misma cantidad de etapas (15), lo que indica que la separación del aceite no depende de esta variable, sino del precalentamiento que se le brinda al aceite antes de entrar a la torre de destilación.

DWC brinda un mejor desempeño en el aceite número tres, debido a que este contiene una gran cantidad de ligeros y no requiere de una carga térmica muy grande para la separación del mismo.

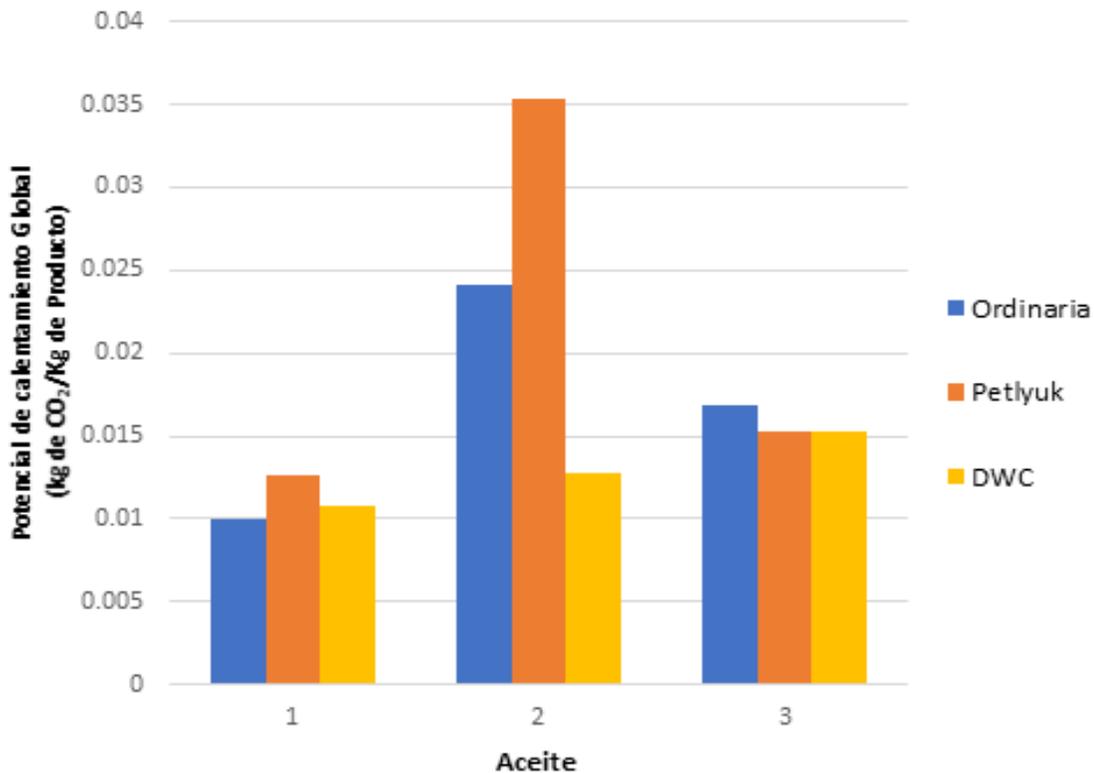
En la gráfica 4.4 se muestra la intensidad de masa para todas las configuraciones. La intensidad de masa es el inverso de la conversión, por lo que ahora el comportamiento de cada configuración se da de manera inversa.



Gráfica 4. 4 Intensidad de masa total del producto

4.1.2 Potencial de Calentamiento Global (GWP)

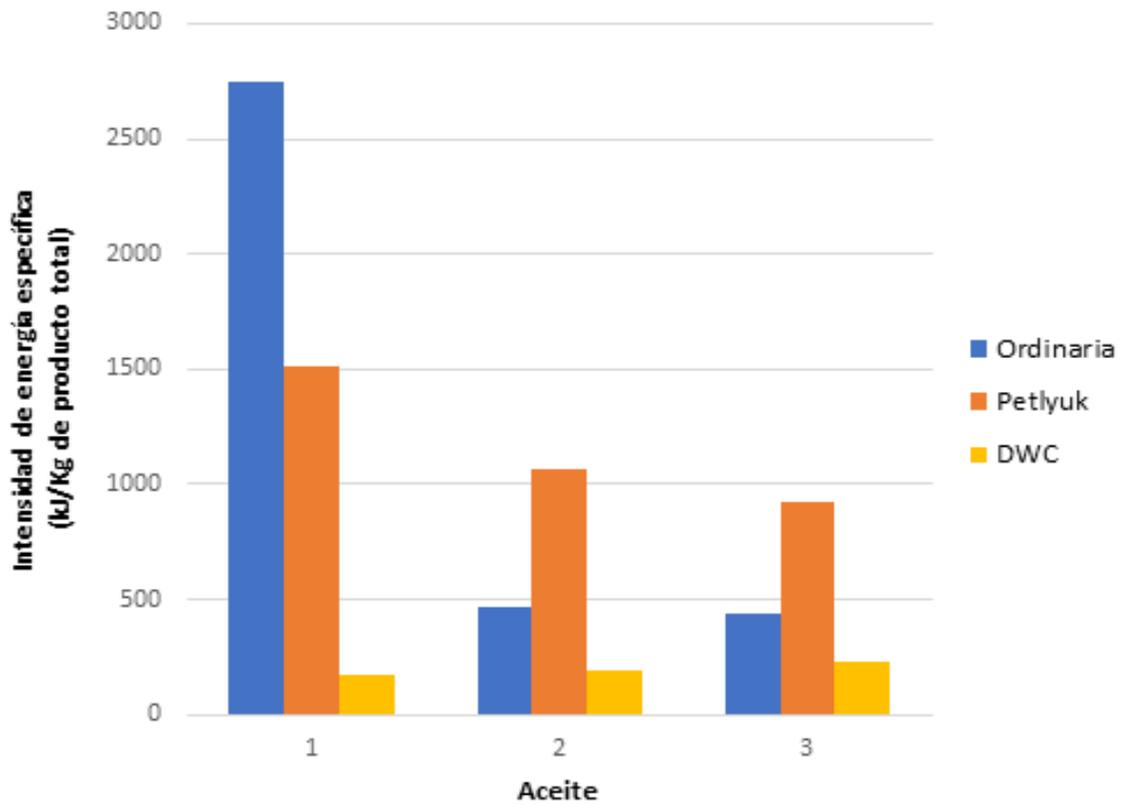
La gráfica 4.5 muestra el potencial de calentamiento global generado por los tres procesos para los tres diferentes aceites. Los valores de GWP para este proceso se asemejan a los reportados en la literatura con valores entre 0.01 y 0.5 kg. CO₂/kg. de producto [22]. DWC como se esperaba es el proceso con menor impacto en este rubro con valores de 0.011, 0.012 y 0.15 para el aceite 1,2 y 3, respectivamente. A pesar de que la configuración ordinaria es más baja para el aceite uno esta diferencia solo consta de 0.01 kg. de CO₂/kg. de producto. DWC es un proceso que tiene menor generación de CO₂ debido a que este solo consta de un rehervidor y un condensador. Mientras que los otros dos procesos cuentan con más de uno.



Gráfica 4. 5 Potencial de calentamiento global para las tres configuraciones

4.1.3 Intensidad de energía específica (R_{SEI})

Las columnas de destilación de pared dividida son capaces de disminuir la cantidad de energía utilizada hasta un 30% [23]. Para nuestro caso de estudio existe una diferencia significativa entre la energía utilizada en el proceso DWC y los otros dos procesos. DWC logra disminuir la cantidad de energía en 6.3%, 18.2%, 25.3% para la producción de los aceites 1,2 y 3, respectivamente.



Gráfica 4. 6 Intensidad de energía específica para las tres configuraciones

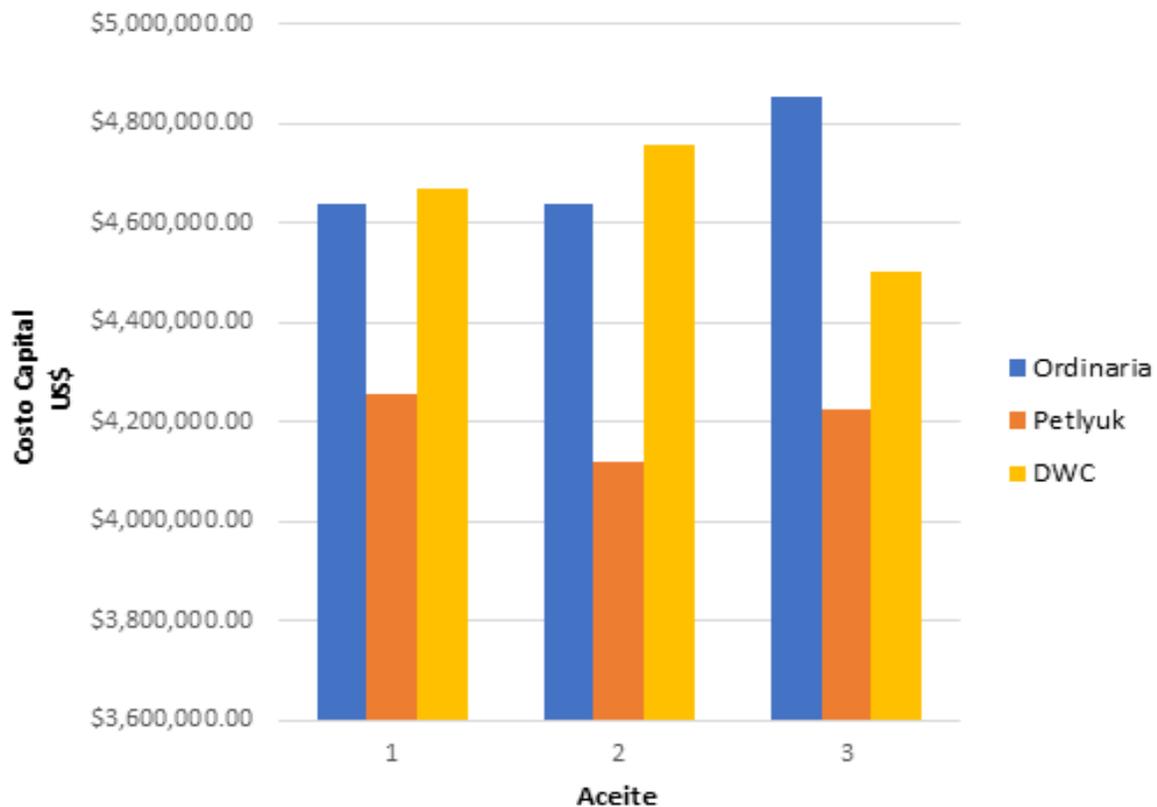
4.1.4 Costo capital

Las columnas Petlyuk mostraron una disminución significativa en el costo capital (gráfica 4.7) mostrando un ahorro de un 9% hasta un 14% con respecto a las otras columnas. Por otro lado, el método de separación DWC superó el costo capital de la configuración “destilación ordinaria”, alcanzando los \$4,700,000 para el aceite 1, siendo este su valor más alto. Sin embargo, esto puede deberse a que Aspen Plus™ no cuenta con un modelo de DWC predeterminado, por lo cual tuvo que ser simulado como se muestra en la figura 3.10. Es por esta razón que puede mostrarse la discrepancia con respecto a la literatura [6] en dónde se indica que las columnas DWC tienen una disminución en su costo.

DWC		PETLYUK	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Costo total de operación [USD/Año]	\$1,366,990	Costo total de operación [USD/Año]	\$1,381,400.00
Costo total de utilidades [USD/Año]	\$96,290	Costo total de utilidades [USD/Año]	\$405,106.00
Costo del equipo [USD]	\$163,200	Costo del equipo [USD]	\$205,100.00
Costo total de instalación [USD]	\$1,075,300	Costo total de instalación [USD]	\$1,025,600.00

Tabla 4. 1 Comparación de costos entre columna DWC y Petlyuk para el aceite 2.

En la tabla 4.0 se puede observar que a pesar de que las columnas DWC muestran un ahorro de \$14,410, \$308,815, \$41,900 para el costo total de operación, el costo de utilidades y costo del equipo respectivamente. El costo de instalación se ve mejorado por Petlyuk en un 4.62% lo equivalente a \$49,900 USD. Por otro lado, anteriormente se había mencionado que pueden existir errores en el programa debido a que Aspen Plus no cuenta con la evaluación económica directa de una torre de destilación DWC esto se puede ser verificado en la gráfica 4.7 donde el costo capital para la columna DWC tiene un valor de \$4,815,150 USD. Debido a que el costo de instalación depende del área de terreno y es donde este valor tiene un mayor incremento para las columnas DWC se puede deducir que el programa toma en cuenta un mayor terreno ya que se cuentan con 3 columnas y esto incrementa el gasto de renta y por ende el costo capital total.



Gráfica 4.7 Costo capital de los procesos simulados

4.2 Caracterización del producto

Al caracterizar los cortes, todas las configuraciones brindaron porcentajes de error menores al 5.5%. Esto nos permite deducir que los aceites obtenidos se asemejan a los aceites vírgenes de manera muy acertada (véase tabla 4.1, 4.2). Por otro lado, se le dio mayor holgura a los parámetros fisicoquímicos debido a que su aproximación solo depende de un valor. En este caso los valores no superaron el 10% en el porcentaje de error (tabla 4.3, 4.4, 4.5). El peso específico de estos aceites es muy cercano al reportado en [4]. De este modo se afirma nuevamente que los aceites obtenidos para los tres procesos son aceites vírgenes.

Aceite Configuración	Aceite 1	Aceite 2	Aceite 3
Ordinaria (%)	4.8	5.5	5.3
Petlyuk (%)	5.8	1.6	2.9
DWC (%)	3.1	3.1	5.6

Tabla 4. 2 Porcentaje de error en el corte del ANL para los tres procesos simulados

Aceite Configuración	Aceite 1	Aceite 2	Aceite 3
Petlyuk (%)	5.6	2.8	6.0
DWC (%)	5.8	6.0	6.0

Tabla 4. 3 Porcentaje de error en el corte del AH para dos procesos simulados

Parámetro	Valor comercial	Ordinaria	Petlyuk	DWC
Punto Inflamación (°C)	min 200	234.91	190.72	203.04
Error Punto Inflamación (%)	-	0.00	4.64	0.00
Peso Especifico	0.9	0.98	0.96	0.97
Error Peso específico (%)	-	8.63	7.14	7.94
Peso molecular (g/gmol)	405	387.86	365.70	370.38
Error Peso Molecular (%)	-	4.23	9.70	8.55

Tabla 4. 4 Caracterización óptima del ANL del aceite 1

Parámetro	Valor comercial	Ordinaria	Petlyuk	DWC
Punto Inflamación (°C)	min 200	180.40	197.35	190.71
Error Punto Inflamación (%)	-	9.8	1.33	4.64
Peso Especifico	0.90	0.92	0.92	0.96
Error Peso específico (%)	-	2.40	2.99	7.14
Peso molecular (g/gmol)	405	378.18	396.40	370.02
Error Peso Molecular (%)	-	6.62	2.12	8.63

Tabla 4. 5 Caracterización óptima del ANL del aceite 2

Parámetro	Valor comercial	Ordinaria	Petlyuk	DWC
Punto Inflamación (°C)	200	194.83	218.49	192.78
Error Punto Inflamación (%)	-	2.58	9.25	3.61
Peso Especifico	0.9	0.92	0.93	0.92
Error Peso específico (%)	-	1.84	3.30	1.89
Peso molecular (g/gmol)	405	424.91	405.78	426.68
Error Peso Molecular (%)	-	4.92	0.19	5.35

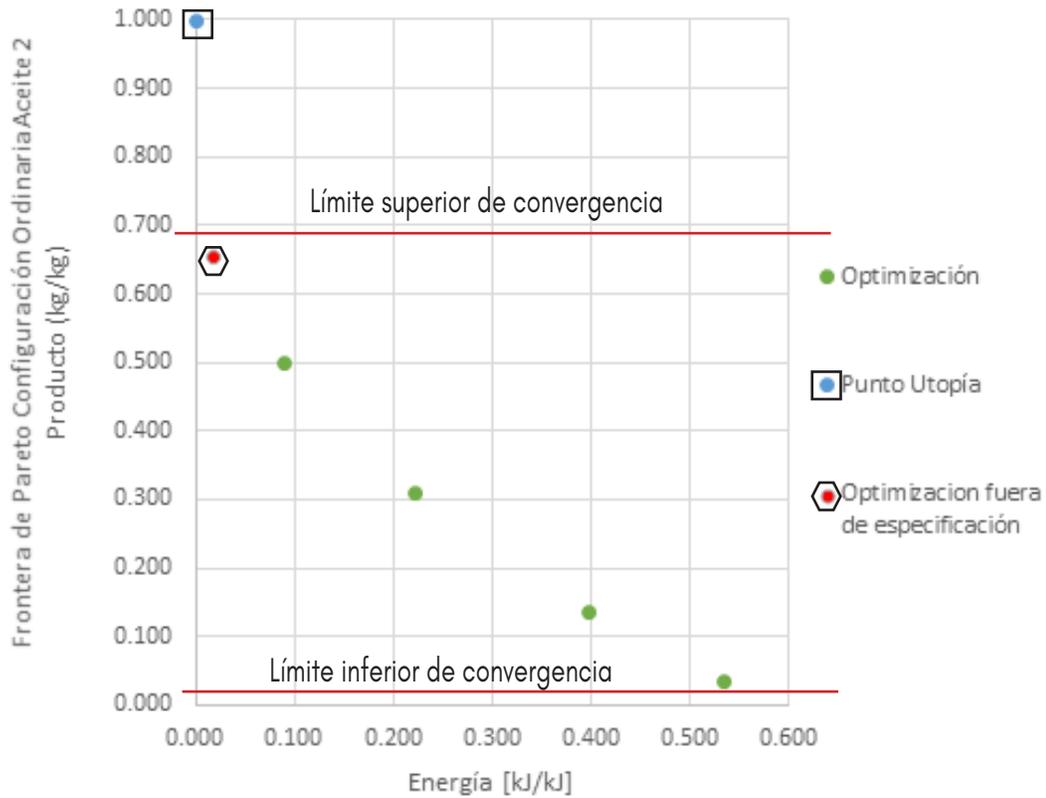
Tabla 4. 6 Caracterización óptima del ANL del aceite 3

4.3 Diseño de una torre DWC

Se propone una torre de destilación que consta de 15 platos tipo sieve, de los cuales 5 se encuentran en la pared que divide la torre. El diámetro y altura de la torre consta de 2.2 metros y 15.5 metros respectivamente. En procesos industriales torres tratadoras de aceites gastados pueden llegar a medir hasta 100 metros de altura [4]. Se sugiere que el rehervidor sea de tipo kettle y un condensador parcial. La alimentación puede ser introducida en la primera o segunda etapa dependiendo del tipo de aceite a utilizar. Entre más cercana se encuentre la alimentación a los fondos, más sencilla es su separación. Así mismo, la separación se ve favorecida por el reflujo en los fondos y destilado. Si se requiere una mayor separación la razón de reflujo en los fondos debe estar cercano al 5. Esté podría ser mayor teóricamente, pero los procesos industriales solo llegan a utilizar un máximo de 5 [2,4,9]. Esta planta tiene una capacidad de 150 MBBL/día, el equivalente a una planta de refinación de PEMEX. En la figura 4.1 se muestra un boceto de la torre de destilación DWC.

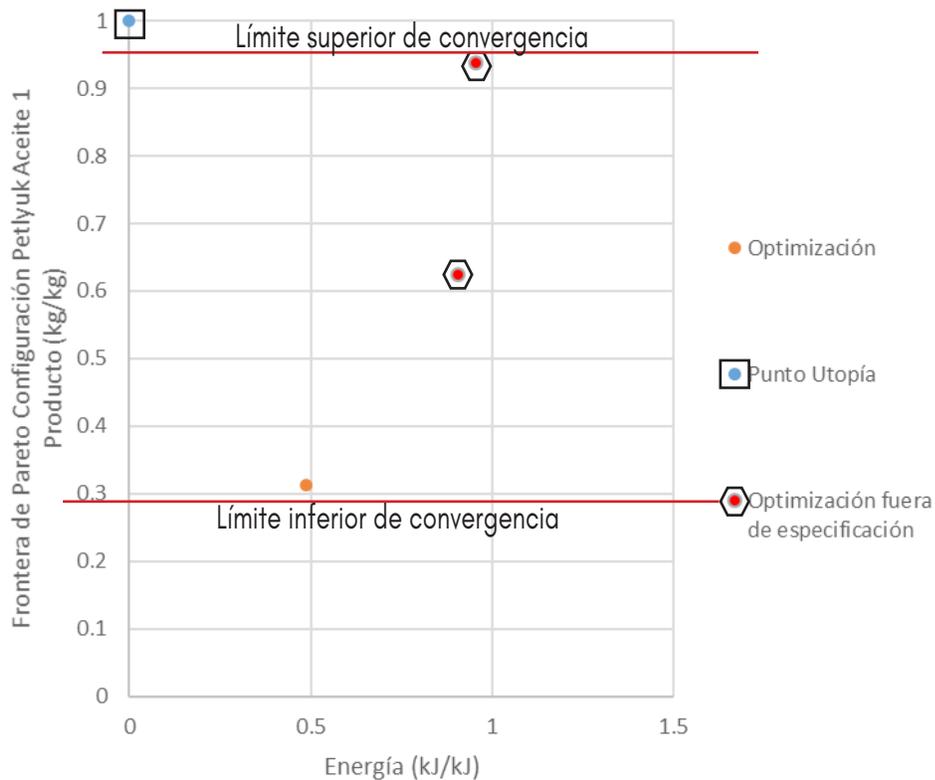
4.4 Optimización

Las fronteras de Pareto fueron obtenidas con el método de épsilon restringida. Al graficar la cantidad de producto obtenido contra la cantidad de energía utilizada se pudo encontrar que existían puntos muy cercanos al punto utopía. Sin embargo, el porcentaje de error en la calidad del aceite superaba al 6% planteado al inicio de este trabajo. En la gráfica 4.9 se muestra la frontera de Pareto obtenida con el aceite 2 mediante la configuración ordinaria, para este caso el punto más cercano al punto utopía alcanzaba un 9% de error en el corte del aceite, por lo tanto, el punto optimó tomado a consideración fue el inferior inmediato.



Gráfica 4. 9 Frontera de Pareto obtenida para el aceite 2 mediante la configuración ordinaria

Por otra parte, en la gráfica 4.10 se muestran puntos en la frontera de Pareto que a pesar de estar más lejanos al punto utopía, no son candidatos a solución debido a que estos también superaban los estándares de calidad planteados para este problema.



Gráfica 4. 10 Frontera de Pareto Obtenida para el aceite 2 mediante la configuración Petlyuk

A pesar de que la optimización ha permitido obtener una familia de soluciones óptimas que conforman la frontera de Pareto, es importante considerar una serie de criterios para elegir la solución eficiente, sin pasar por alto el punto utopía. En el presente caso de estudio se han considerado las propiedades físicas para garantizar la calidad de un aceite según la ASTM.

Las tablas 4.6, 4.7 y 4.8 muestran las condiciones de operación óptimas (soluciones eficientes) de las columnas de destilación para el tratamiento del aceite 1,2 y 3 con su respectiva forma de separación.

Configuración Parámetro	Ordinaria	Petlyuk	DWC
Alimentación (°C)	400	280	270
Aceite Neutro Ligero (°C)	404	314	387
Aceite Husos (°C)	-	248	273
Presión (bar)	-	0.3	0.4
Columna 1			
Relación de recirculado en condensador	1	1	1
Relación de recirculado en rehervidor	5	1.5	4.5
Columna 2			
Relación de recirculado en condensador	1	2.67	-
Relación de recirculado en rehervidor	2	2.5	-

Tabla 4. 6 Condiciones de operación óptimas del aceite 1 para las tres configuraciones

Configuración Parámetro	Ordinaria	Petyuk	DWC
Alimentación (°C)	200	300	256
Aceite Neutro Ligero (°C)	341	393	366
Aceite Husos (°C)	-	378	228
Presión (bar)	0.4	0.4	0.4
Columna 1			
Relación de recirculado en condensador	0.5	1	1.19
Relación de recirculado en rehervidor	1.36	1	1.53
Columna 2			
Relación de recirculado en condensador	0.5	1	-
Relación de recirculado en rehervidor	0.5	1.01	-

Tabla 4. 7 Condiciones de operación óptimas del aceite 2 para las tres configuraciones

Configuración Parámetro	Ordinaria	Petyuk	DWC
Alimentación (°C)	264	200	270
Aceite Neutro Ligero (°C)	372	369	385
Aceite Husos (°C)	-	336	254
Presión (bar)	0.4	0.4	0.4
Columna 1			
Relación de recirculado en condensador	1	2	1
Relación de recirculado en rehervidor	1.2	1	1.5
Columna 2			
Relación de recirculado en condensador	1	2	-
Relación de recirculado en rehervidor	1.2	1.07	-

Tabla 4. 8 Condiciones de operación óptimas del aceite 3 para las tres configuraciones

El tratamiento de estos aceites no permite superar temperaturas de 600°C debido a que el aceite virgen obtenido podría perder las propiedades físicas y químicas buscadas. En este trabajo los aceites producidos no superaron los 404°C, lo cual demuestra nuevamente que es un aceite que

puede ser clasificado como virgen. Por otra parte, las condiciones de operación encontradas mediante la optimización se encuentran dentro de las utilizadas en la industria actualmente [2,4]. En las tablas 4.6 y 4.8 se observa que todas las columnas de destilación no superan una relación de recirculado de 5. Debido a esto la conversión de producto llega a ser alta.

4.5 Instalación de Planta

Actualmente la economía del país ha sufrido una disminución en las actividades industriales y un aumento en el sector de servicios. Las zonas que representan mayores problemas económicos y sociales en la ciudad de México son; Iztapalapa e Iztacalco, Azcapotzalco y Gustavo A. Madero, Xochimilco, Milpa Alta, Tláhuac, Cuauhtémoc y Venustiano Carranza [24].

La delegación Gustavo A. Madero e Iztapalapa son dos de las cinco delegaciones que cuentan con el menor costo por metro cuadrado de terreno en la Ciudad de México. [28] Además Iztapalapa y Gustavo A Madero son los lugares que cuentan con mayor número de habitantes [25]. Sin embargo, Iztapalapa cuenta con mayor cantidad de unidades económicas (73,314), mientras que la delegación Gustavo a Madero cuenta con tan solo 45,527 [26].

Por otro lado la delegación Gustavo A. Madero colinda con Tlalnepantla de Baz, Ecatepec de Morelos, Coacalco de Berriozábal, Tultitlán, Venustiano Carranza, Cuauhtémoc, Nezahualcoyotl y Atzacapozalco , lo cual permite que la recolección de aceite gastado (materia prima) pueda hacerse en estas delegaciones evitando largos trayectos de transportación.

El impacto ambiental que esta planta produce medida en términos de GWP ronda entre los 0.01 y los 0.02 kg. de CO₂/kg. de producto obtenido. Además podría generar ingresos de hasta 1 millón 500 mil dólares anuales ayudando a la reactivación de la industria en uno de los lugares donde la actividad industrial ha ido a la baja. Es por esto que la delegación Gustavo A Madero es una buena opción para implementar una planta tratadora de aceites.

Actualmente la economía del país ha sufrido una disminución en las actividades industriales y un aumento en el sector de servicios. Las zonas que representan mayores problemas económicos y sociales en la ciudad de México son; Iztapalapa e Iztacalco, Azcapotzalco y Gustavo A. Madero, Xochimilco, Milpa Alta, Tláhuac, Cuauhtémoc y Venustiano Carranza [24].

De estas delegaciones, Iztapalapa y Gustavo A Madero son los lugares que cuentan con mayor número de habitantes [25]. Sin embargo, Iztapalapa cuenta con mayor cantidad de unidades económicas (73,314), mientras que la delegación Gustavo a Madero cuenta con tan solo 45,527 [26].

De esta forma se decidió que la planta podría instalarse en uno de los lugares que cuente con alto número de habitantes, pero con menor cantidad de empresas, por lo tanto, la delegación Gustavo A Madero es una buena opción para construir una planta tratadora de aceites.

Una planta DWC podría generar ingresos de hasta 1 millón 500 mil dólares anuales ayudando a la reactivación de la industria en uno de los lugares donde la actividad industrial de transformación ha ido a la baja.

CAPÍTULO

5

CONCLUSIONES

La obtención de un aceite virgen depende del tipo de tratamiento que se le brinde y el tipo de aceite que se requiere tratar. La separación aceites con mayor cantidad de componentes pesados se ven favorecidos por Petlyuk y aquellos aceites que tienen una mayor carga de ligeros pueden ser favorecidos por una configuración DWC u ordinaria.

Cada configuración tiene ventajas y desventajas. Dependiendo el objetivo a cumplir se podrá determinar que arreglo es más conveniente.

Las columnas de destilación tipo Petlyuk presentan una mayor conversión de aceite neutro ligero y aceite husos para casi todos los casos, esto se debe al calentamiento previo que se le brinda al aceite en este proceso.

Las torres de destilación DWC presentan un buen desempeño para índices de sustentabilidad como: potencial de calentamiento global e intensidad de energía específica. Esto quiere decir, que tienen afinidad a ser procesos menos dañinos al entorno debido a la baja cantidad de contaminantes generados (CO_2) y a la baja cantidad de energía requerida para su operación.

En la literatura las torres de destilación DWC presentan un ahorro en el costo capital, mientras que en este trabajo resultó ser uno de los procesos más costosos en este ámbito. Sin embargo, este tipo de discrepancias se le acredita al modelo económico utilizado por Aspen Plus, ya que debido a la metodología de evaluación económica considera un cálculo para la instalación de tres columnas, en lugar de una.

La frontera de Pareto a pesar de ser una herramienta útil para encontrar la solución eficiente de diferentes procesos, requiere ser complementada con ciertos criterios particulares de acuerdo al caso de estudio, en particular se consideraron las propiedades físicas de los aceites.

El presente estudio permite identificar la oportunidad potencial de re-refinar los aceites gastados, esto aumentaría la actividad industrial en México, ya que desafortunadamente en la actualidad han ido a la baja, debido a que las empresas en México se dedican más a servicios o a procesos de maquilado. La instalación de una planta en la delegación Gustavo A. Madero generaría empleos en un lugar que ha ido a la baja en actividad industrial los últimos años (sección 4.5).

TRABAJO A FUTURO

Se propone agregar al proceso un pretratamiento con el fin de determinar si se podrían reducir costos, generar un aceite de mayor pureza, así como una mayor conversión. Existen algunos procesos reportados en la literatura [2,4], los cuales demuestran que los pretratamientos ayudan a mejorar las propiedades fisicoquímicas del aceite.

Adaptar un sistema de control a la destilación con pretratamiento y sin pretratamiento, el cual podría ser comparado posteriormente y brindar información acerca de la dificultad para ser implementado. Hacer una comparación entre la destilación Petlyuk y DWC para determinar las ventajas de tener procesos controlados contra aquellos que no lo están. Los sistemas de control reportados actualmente para columnas de destilación de pared dividida mencionan que el control se vuelve más difícil en estas columnas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ferrera-Cerrato, R., Rojas-Avelizapa, N., & Poggi-Varaldo, H. (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *REVISTA LATINOAMERICANA DE MICROBIOLOGÍA*, 48(2), 179.
- [2] Kupareva, A., Mäki-Arvela, P., & Murzin, D. (2013). Technology for refining used lube oils applied in Europe: a review. *Journal Of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(10), 1780-1793. <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.4137>
- [3] Díaz González, A. (2015). Programa de Gestión Integral de Residuos de Aceite Vegetal Usado (AVU) y Grasa Animal (GA) Generados en el Parque Recreativo y Zoológico Piscilago.
- [4] Awaja, F., & Pavel, D. (2006). Design aspects of used lubricating oil re-refining [recurso electrónico]. Países Bajos: Elsevier.
- [5] Wolff, E., & Skogestad, S. (1995). Operation of Integrated Three-Product (Petlyuk) Distillation Columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 34(6), 2094-2103. <http://dx.doi.org/10.1021/ie00045a018>
- [6] Errico, M., Tola, G., Rong, B., Demurtas, D., & Turunen, I. (2009). Energy saving and capital cost evaluation in distillation column sequences with a divided wall column. *Chemical Engineering Research And Design*, 87(12), 1649-1657. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2009.05.006>
- [7] Kaibel, B., Jansen, H., Zich, E., & Olujic, Z. (2006). Unfixed dividing wall technology for packed and tray distillation columns. *Distillation Absorption*, 152, 252-266.
- [8] Yildirim, Ö., Kiss, A., & Kenig, E. (2011). Dividing wall columns in chemical process industry: A review on current activities. *Separation And Purification Technology*, 80(3), 403-417. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2011.05.009>
- [9] Chu, K., Cadoret, L., Yu, C., & Ward, J. (2011). A New Shortcut Design Method and Economic Analysis of Divided Wall Columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(15), 9221-9235. <http://dx.doi.org/10.1021/ie200234p>
- [10] Ferrera-Cerrato, R., Rojas-Avelizapa, N., & Poggi-Varaldo, H. (2017). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *REVISTA LATINOAMERICANA DE MICROBIOLOGÍA*, 48(2), 1.
- [11] Ruiz-Mercado, G., Smith, R., & Gonzalez, M. (2012). Sustainability Indicators for Chemical Processes: I. Taxonomy. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(5), 2309-2328. <http://dx.doi.org/10.1021/ie102116e>
- [12] Managing Used Oil: Answer to Frequent Questions for Businesses | USEPA. (2017). USEPA. Retrieved 6 September 2017, from <https://www.epa.gov/hw/managing-used-oil-answers-frequent-questions-businesses>
- [13] Cuatro contaminantes letales para los motores diesel. (2017). Noria Latín América. Retrieved 6 September 2017, from <http://noria.mx/lublearn/cuatro-contaminantes-letales-para-los-motores-diesel/>
- [14] Seader, J., Henley, E., & Roper, D. (2011). Separation process principles. Hoboken, NJ: Wiley.
- [15] Overview of optimization. (2006). *Process Integration*, 285-314. [http://dx.doi.org/10.1016/s1874-5970\(06\)80012-3](http://dx.doi.org/10.1016/s1874-5970(06)80012-3)
- [16] Burke, E., & Kendall, G. (2014). Search Methodologies. Boston, MA: Springer US.
- [17] Contreras Leiva, M., & Rojas, J. (2015). New Tuning Method for PI Controllers based on Pareto-Optimal Criterion with Robustness Constraint. *IEEE Latin America Transactions*, 13(2), 434-440. <http://dx.doi.org/10.1109/tla.2015.7055561>

- [18] Rivera Toledo, M. (2017). Optimización multiobjetivo. Presentación, Universidad Iberoamericana.
- [19] Biegler, L. (2010). Nonlinear programming. Philadelphia, Pa.: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [20] Simulación de procesos químicos usando Aspen Plus :: Modelado y Simulación. (2017). Modelado y Simulación en <http://modeladoysimulacioneniqu.webnode.es>. Retrieved 25 September 2017, from <http://modeladoysimulacioneniqu.webnode.es/simulacion-en-ee/simulacion-de-procesos-quimicos-usando-aspen-plus/>
- [21] Aspen Manual User. (2017). Aspen Plus. Retrieved 3 October 2017, from <https://web.ist.utl.pt/ist11038/acad/Aspen/AspUserGuide10.pdf>
- [22] Kanokkantapong, V., Kiatkittipong, W., Panyapinyopol, B., Wongsuchoto, P., & Pavasant, P. (2009). Used lubricating oil management options based on life cycle thinking. Resources, Conservation And Recycling, 53(5), 294-299. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.01.002>
- [23] Adrian, T., Schoenmakers, H., & Boll, M. (2004). Model predictive control of integrated unit operations: Control of a divided wall column. Chemical Engineering And Processing: Process Intensification, 43(3), 347-355. [http://dx.doi.org/10.1016/s0255-2701\(03\)00114-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0255-2701(03)00114-4)
- [24] Zonas Industriales. (2017). Economia.unam.mx. Retrieved 25 October 2017, from <http://www.economia.unam.mx/cedrus/investigacion/propuestas-politica/zonas-industriales.html>
- [25] Número de habitantes. Ciudad de México. (2017). Cuentame.inegi.org.mx. Retrieved 25 October 2017, from <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/>
- [26] Introduction to Optimization | NEOS. (2017). Neos-guide.org. Retrieved 28 November 2017, from <https://neos-guide.org/content/optimization-introduction>
- [27] Klemes, J. (2011). Sustainability in the process industry. New York: McGraw-Hill.
- [28] Residuos. (2018). Apps1.semarnat.gob.mx. Retrieved 28 February 2018, from http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap7_Residuos.pdf
- [29] (2018). Cenapred.gob.mx. Retrieved 28 February 2018, from <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/56.pdf>