

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**Diseño de un proceso para el aprovechamiento de los hidrocarburos
residuales procedentes de los barcos que arriban a Moín para la
obtención de un combustible.**

PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

ADOLFO MADRIGAL CALDERÓN

CIUDAD UNIVERSTARIA RODRIGO FACIO

SAN JOSÉ, COSTA RICA

2015

TRIBUNAL EXAMINADOR

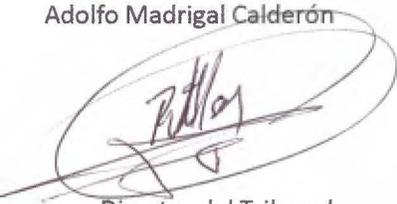
Proyecto de graduación presentado ante la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, como requisito final para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Química.

Sustentante

Adolfo Madrigal Calderón

Aprobado por:

Ing. Rodolfo Watson Gómez, MSc.
Profesor Escuela de Ingeniería Química



Director del Tribunal

Ph.D. Eduardo Rivera Porras.
Profesor Escuela de Ingeniería Química



Director del Proyecto

Ing. Adolfo Ulate Brenes, Mag.
Profesor Escuela de Ingeniería Química



Miembro Lector

Ing. José Rafael Navarro Segura.
Ingeniero Químico.



Miembro Lector

Ing. Benjamín Mairena Calvo
Profesor Escuela de Ingeniería Química

Miembro Invitado

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2016

DEDICATORIA

El presente proyecto de graduación se lo dedico a tres ejes que fueron indispensables para poder llevar a cabo el presente trabajo:

- A mi papá, mi mamá y mi hermano por brindarme la oportunidad de estudiar y apoyarme en todo momento.
- A Dios por brindarme salud, paz y sabiduría para afrontar cada una de las pruebas a las que me afronté en mi vida universitaria y por las que vienen.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy grande a los profesores de tesis: Eduardo Rivera, Adolfo Ulate y José Rafael Navarro, por su colaboración, comunicación y educación con mi persona, sin ellos este proyecto no hubiese podido ser llevado a cabo.

Del mismo modo un agradecimiento a mis compañeros de universidad, así como a todos los profesores, ya que gracias a estos años de estudio es que se pudo llevar a cabo dicha investigación.

Por otra parte, se le agradece a Olman Aguilar y a Emilio García por su colaboración en el laboratorio de Ingeniería Química, ya que, tanto a lo largo de la universidad como en este proyecto, se tuvo que hacer uso de estas instalaciones y siempre estuvieron a total disposición.

Por último, un agradecimiento a la empresa ACASE S.A. por su colaboración en todo lo que se refiere al aceite usado, ya que son los proveedores de materia prima, que hicieron posible un muestreo representativo de la misma.

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo fue diseñar un proceso para llevar a cabo la obtención de un combustible a partir de la mezcla residual de los aceites residuales procedentes de los barcos que arriban a la zona de Moín, Limón, Costa Rica. Estos lubricantes de desecho son hidrocarburos con contaminantes de diverso tipo, los cuales se producen con mucha frecuencia y donde hoy en día el único uso que se les da, es su incineración en hornos de uso directo, como lo es la industria cementera. Por ende, se planteó el presente proyecto de graduación, ya que es una necesidad ambiental, la cual se lleva a cabo en otros países más desarrollados, y donde se pueda aprovechar una materia considerada como un residuo contaminado.

Para poder llevar a cabo el proyecto se realizó un muestreo durante un mes, en distintos barcos, del aceite residual. Con el fin de caracterizar la materia prima, contemplando el hecho de la alta variabilidad que puede tener este producto. Se cuantificó el contenido de agua y sedimento básico en las muestras, así como el contenido de metales pesados. Se obtuvo $(20,4 \pm 4,6)$ %v/v de agua y sedimento y 6 939 ppm de metales pesados como mínimo, dicho valor puede ser mayor dependiendo de la calidad del lubricante, sin embargo, para barcos ese es el dato correcto. Por otra parte, se hizo una estimación del volumen de producción de acuerdo a los datos históricos de la empresa ACASE S.A., la cual es una de las empresas que se encarga de recolectar el residuo de los barcos que arriban al muelle de Moín, Limón. Se estima que la planta debe de ser capaz de procesar 25 000 litros de aceite sucio por día.

Posteriormente se compararon mediante una matriz de selección, las principales tecnologías para llevar a cabo dicho proceso, con el fin de seleccionar la que mejor se ajuste a las necesidades del proyecto. Se estudiaron: proceso térmico, tratamiento con reacción química, destilación al vacío y extracción con solvente. Para la matriz se escogieron los siguientes parámetros técnicos y económicos: impacto ambiental, costo de operación, costo de equipos, seguridad de operación, mantenimiento de los equipos, subproductos obtenidos, desechos generados, calidad del producto obtenido y facilidad de operar. Se concluyó que el tratamiento con reacción química es la opción que mejor se ajusta a las necesidades del proyecto.

Una vez seleccionado el tratamiento se procedió a diseñar un proceso para tratar el aceite usado, el cual inicia con la toma del aceite, posteriormente se le mide el contenido de agua y sedimento. Se procede mediante un sistema de decantación a la eliminación del agua libre, luego se hace pasar el aceite por un intercambiador de calor y se alimenta a un reactor. En este equipo se agrega ácido sulfúrico para separar los metales pesados y aditivos del aceite. Luego se separa el lodo ácido y se neutraliza el aceite. Por último, se hace pasar el producto por una centrifuga bifásica donde se separan los contaminantes del mismo. De esta manera se procede a almacenar el lubricante combustible listo para su uso.

Al proceso se le hicieron los balances de masa y energía, con esa información se dimensionaron los equipos para el volumen de producción planteado y se resumió todo en un diagrama de flujo de proceso el cual se adjunta al presente.

Por otra parte, se hizo un análisis económico, donde se cotizaron las bombas, tuberías, instalaciones, costos de operación, permisos, equipos, mano de obra, etcétera. Se propuso un precio al producto y se hicieron los flujos de caja, planeando cancelar la inversión a 10 años. Se obtuvo un TIR del 21 % y un VAN de \$ 1 074 275.

Finalmente se concluye lo siguiente: llevar a cabo la instalación de una planta procesadora de aceites usados, es un proyecto el cual ambientalmente representa un beneficio, ya que como se ha comentado anteriormente el aceite residual no recibe ningún tratamiento actualmente para su posterior uso y económicamente es viable, ya que presenta un VAN positivo y alto, así como un TIR mayor al 10 %. La metodología que mejor se ajusta a las necesidades planteadas en este proyecto de aprovechamiento del aceite usado, resulta ser un tratamiento con reacción química y otros métodos físicos de limpieza como la centrifugación del mismo. Por ende, en caso de implementarse dicho diseño se fortalece el lineamiento planteado en el Convenio de Basilea, en donde busca hacer conciencia en los seres humanos sobre la contaminación existente hoy en día por parte de los desechos peligrosos y la incitación de este ente a crear e innovar en procesos que los traten y a la vez sean amigables con el entorno.

ÍNDICE GENERAL

1.	EL ACEITE USADO.....	1
1.1.	Convenio de Basilea.....	3
1.2.	Reglamento para el registro, importación, etiquetado y control de productos peligrosos.....	4
2.	PROBLEMÁTICAS DEL ACEITE USADO.....	6
2.1.	Contenido de metales pesados y otros contaminantes en los aceites usados.....	6
2.1.1.	Legislación nacional respecto a los metales pesados y otros contaminantes.....	8
2.2.	Contenido de agua y sedimento básico en el aceite residual.....	10
2.2.1.	Legislación nacional para el vertido de aguas residuales provenientes del procesamiento de aceites.....	11
3.	PRODUCTOS A PARTIR DE UN ACEITE USADO.....	14
3.1.	Aceite Combustible:.....	14
3.2.	Aceite Base.....	16
4.	EQUIPOS Y TECNOLOGÍAS.....	19
4.1.	Eliminación del Agua y Sedimento.....	20
4.1.1.	Centrifugación.....	20
4.1.2.	Sedimentación.....	22
4.2.	Tratamientos al Aceite.....	23
4.2.1.	Evaporación por calentamiento.....	24
4.2.2.	Tratamiento químico.....	25
4.2.3.	Destilación al vacío.....	27
4.2.4.	Extracción con un solvente.....	31

4.3.	Refinamiento del producto.....	33
4.3.1.	Hidrotratamiento.....	33
4.3.2.	Filtración con arcillas.....	34
5.	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	36
5.1.	Muestreo del Aceite Residual.....	36
5.2.	Contenido de agua y sedimento.....	38
5.3.	Contenido de metales pesados.....	39
6.	ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE PRODUCCIÓN.....	43
7.	SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA EL PROCESO.....	45
7.1.	Parámetros seleccionados para comparar con la herramienta de selección.....	45
7.1.1.	Impacto ambiental.....	46
7.1.2.	Facilidad de operación.....	47
7.1.3.	Mantenimiento.....	47
7.1.4.	Costos de equipo.....	48
7.1.5.	Costos de operación.....	49
7.1.6.	Seguridad de operación.....	50
7.1.7.	Desechos.....	51
7.1.8.	Subproductos.....	51
7.1.9.	Calidad del producto obtenido.....	52
7.2.	Ponderación de los parámetros.....	53
7.3.	Selección de tecnologías.....	53
8.	DISEÑO DEL PROCESO Y CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	58
8.1.	Proceso para la obtención del aceite combustible.....	61

8.1.1.	Caracterización.....	61
8.1.2.	Separación del agua libre.....	62
8.1.3.	Calentamiento del aceite.....	63
8.1.4.	Reacción de limpieza con ácido sulfúrico.....	63
8.1.5.	Sedimentación para separar el lodo ácido.....	65
8.1.6.	Neutralización.....	66
8.1.7.	Centrifugación.....	68
8.1.8.	Resumen del proceso y tiempos de operación.....	69
8.2.	Tratamiento de aguas residuales.....	73
8.3.	Tratamiento del lodo ácido cargado con metales pesados.....	75
9.	BALANCES DE MATERIA, ENERGÍA Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS.....	76
10.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	86
11.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	92
11.1.	Conclusiones:.....	92
11.2.	Recomendaciones:.....	94
12.	NOMENCLATURA.....	95
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	97
14.	APÉNDICES.....	119
A.	Datos Experimentales.....	120
B.	Datos Intermedios.....	123
C.	Muestra de Cálculos.....	126
15.	ANEXOS.....	146
	Anexo 1. Barcos muestreados en la Investigación.....	147

Anexo 2. Calificaciones otorgadas por el Director, lectores y sustentantes empleados en la matriz de selección.....	148
Anexo 3. Resumen de Norma ASTM-D1796-11: Metodología estándar para medir el sedimento y agua.....	152
Anexo 4. Cotizaciones realizadas.	154
Anexo 5. Temperaturas promedio de Moín según el IMN.....	158
Anexo 6. Figuras de otras referencias utilizadas.....	159

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Límites de los análisis fisicoquímicos que se le deben hacer a los combustibles antes de ser empleados en un horno (Ministerio de Salud; Presidencia de la República, 2004).....	9
Cuadro 2.2. Parámetros y límites de emisiones de los hornos que empleen combustibles alternos (Ministerio de Salud; Presidencia de la República, 2004).....	10
Cuadro 2.3. Parámetros para vertido de aguas según el decreto DE-33601-MINAE-S (Presidencia de la República; Ministro de Ambiente y Energía; Ministra de Salud, 2007).....	12
Cuadro 3.1. Especificaciones de los Aceites Combustibles (ASTM, 2014).....	15
Cuadro 5.1. Partículas metálicas por desgaste del motor, degradación del aceite y por contaminación en los lubricantes (Saldivia, 2013),(ASTM,2010).....	40
Cuadro 5.2. Contenido de metales pesados en lubricantes usados (Moya & Botamino, 2010).....	42
Cuadro 6.1. Registro histórico de la empresa ACASE S.A. acerca la cantidad de aceite residual que se obtiene mensualmente por parte de ellos (ACASE S.A., 2015).	43
Cuadro 7.1. Porcentajes de importancia promedio de los parámetros para seleccionar el proceso a llevar a cabo (Madrigal, 2015).....	53
Cuadro 7.2. Notas promedio de las tecnologías para separar agua y sedimento, respecto a cada parámetros técnico y económico (Madrigal, 2015).....	54
Cuadro 7.3. Notas promedio de las tecnologías para tratar los metales y aditivos, respecto a cada parámetros técnico y (Madrigal, 2015).....	54

Cuadro 7.4. Notas promedio para el refinamiento del producto, respecto a cada parámetros técnico y económico (Madrigal, 2015).....	56
Cuadro 7.5. Calificación obtenida para las tecnologías para en cada etapa del proyecto (Madrigal, 2015).....	56
Cuadro 8.1. Propiedades del producto obtenido a partir del aceite residual y las del Búnker C (Eximport S.A., 2013).....	60
Cuadro 8.2. Acidez del aceite al agregarle KOH en diferentes cantidades (Madrigal, 2015).	67
Cuadro 8.3. Acidez del aceite a distintos tiempos de neutralización para 3,00 %m/m de cal (Madrigal, 2015).....	67
Cuadro 9.1. Temperatura y presión promedio de Moín (IMN, 2013).....	76
Cuadro 9.2. Flujos máxicos de las corrientes del proceso (Madrigal, 2015).....	77
Cuadro 9.3. Dimensiones de los parámetros de los decantadores diseñados (Madrigal, 2015).....	79
Cuadro 9.4. Parámetros diseñados para el intercambiador de calor (Madrigal, 2015).....	80
Cuadro 9.5. Dimensiones de los reactores diseñados (Madrigal, 2015).....	81
Cuadro 9.6. Dimensiones y características de la centrifugadora (Madrigal, 2015).....	83
Cuadro 9.7. Dimensiones de los tanques de almacenamiento (Madrigal, 2015).....	84
Cuadro 9.8. Capacidades y potencias de las bombas para trasiego (Madrigal, 2015).....	85
Cuadro 10.1. Salarios y cargas sociales mensuales de los empleados de la planta (Ministerio de Trabajo, 2015).....	87
Cuadro 10.2. Estimación del capital de trabajo anual (Madrigal, 2015).....	87

Cuadro 10.3. Estimación de la Inversión total del capital (Madrigal, 2015).....	88
Cuadro 10.4. Estimación de los ingresos anuales del proyecto (Madrigal, 2015).....	89
Cuadro 10.5. Flujo de caja para los primeros 5 años (Madrigal, 2015).....	90
Cuadro A.1. Contenido de agua y sedimento en el aceite usado de los barcos que arriban a Moín (Propio, 2015).....	103
Cuadro A.2. Tiempo de separación por diferencia de densidad en el aceite residual (Madrigal, 2015).....	103
Cuadro A.3. Datos de tiempo y BSW en el aceite tratado para estimar la cinética de reacción (Madrigal, 2015).....	103
Cuadro A.4. BSW obtenido en los aceites posterior a la centrifugación para distintos porcentajes de ácido sulfúrico empleado durante la reacción (Madrigal, 2015).....	104
Cuadro B.1. Propiedades físico-químicas de las sustancias empleadas y las producidas en el proceso de obtención de un combustible a partir del aceite residual (Madrigal, 2015).....	105
Cuadro B.2. Flujos máxicos de las corrientes del proceso (Madrigal, 2015).....	106
Cuadro B.3. Dimensiones del intercambiador de calor.....	106
Cuadro B.4. Flujos de caja para los primeros 5 años (Madrigal, 2015).....	107
Cuadro B.5. Flujos de caja para los segundos 5 años (Madrigal, 2015).....	107
Cuadro D.1. Barcos muestreados en la presente investigación (Propio, 2015).....	121
Cuadro D.2. Porcentajes de importancia brindados por el director, lectores y sustentante a los parámetros con los cuales se pretende seleccionar el proceso a llevar a cabo (Madrigal, 2015).....	122
Cuadro D.3. Evaluación brindada por el director, lectores y sustentante a cada tecnología según cada uno de los parámetros escogidos para comparar (Propio, 2015)....	123

Cuadro D.4. Cotizaciones realizadas para los equipos y otros aspectos a considerar del análisis económico (Madrigal, 2015).....	128
Cuadro D.5. Temperaturas promedio de Moín para el año 2013 (IMN; 2013).....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Diagrama de bloques del proceso global (Madrigal, 2015).....	19
Figura 4.2. Diagrama del funcionamiento de una centrifugadora (Peng, 2014).....	21
Figura 4.3. Diagrama de un sedimentador (UNAD, 2015).....	22
Figura 4.4. Diagrama del proceso con reacción química (Delgado & Parra, 2007).....	26
Figura 4.5. Diagrama del proceso para obtener un aceite base por medio de una destilación al vacío (CAR/PL, 2001).....	28
Figura 4.6. Diagrama de procesos para obtener un aceite base por medio de una destilación al vacío (Everest Blower Systems, 2007).....	29
Figura 4.7. Diagrama del proceso de extracción con solvente (Emam & Shoaib, 2013).....	31
Figura 5.1. Diagrama de las alturas de muestreo en una cisterna (Madrigal, 2015).....	37
Figura 5.2. Variación del contenido de agua y sedimento en las réplicas analizadas de aceite usado de barco (Propio, 2015).....	39
Figura 8.1. Fases generadas posterior a la reacción entre el ácido sulfúrico y el aceite usado procedente de Moín (Madrigal, 2015).....	59
Figura 8.2. Variación del BSW con respecto al tiempo de sedimentación del agua libre (Madrigal, 2015).....	62
Figura 8.3. Variación del BSW con respecto al tiempo de reacción (Madrigal, 2015).....	64

Figura 8.4. Variación del BSW con respecto al tiempo de sedimentación del ácido (Madrigal, 2015).....	65
Figura 8.5. Diagrama de flujo del proceso diseñado para la obtención de un combustible a partir del aceite residual de los barcos que arriban en Moín (Madrigal, 2015).....	69
Figura 8.6. Gráfico de Gantt con los tiempos de operación del proceso diseñado (Madrigal, 2015).....	71
Figura 9.1. Separador de agua libre para aceite residual diseñado (Madrigal, 2015).....	78
Figura 9.2. Intercambiador de calor para subir la temperatura a 50 °C del aceite (Madrigal, 2015).....	79
Figura 9.3. Reactor batch con dimensiones de un tanque agitado estándar (Mott, 2006).....	80
Figura D.1. Calculadora de préstamos del BCR (BCR, 2015).....	130
Figura D.2. Catálogo de filtros prensa (COREL y Cía S.A, 2012).....	130
Figura D.3. Figura del Mott empleada para determinar el número de potencia.....	132
Figura D.3. Figura del Perry empleada para determinar el tamaño de la centrifuga.....	132
Figura D.4. Figura del Perry empleada para determinar el tamaño de la centrifuga.....	133
Figura D.5. Figura del Kern empleada para determinar el tamaño del intercambiador.....	133
Figura D.6. Figura del Kern empleada para determinar el tamaño del intercambiador.....	134
Figura D.7. Figura del Kern empleada para determinar el tamaño del intercambiador.....	134
Figura D.8. Fotografía de separación de agua libre y de la simulación del reactor.....	135

GLOSARIO

% m/m: Porcentaje masa en masa. Quiere decir cuánto se tiene de un componente en masa respecto a otro.

% v/v: Porcentaje volumen en volumen. Quiere decir cuánto se tiene de un componente en volumen respecto a otro.

Acidez: Para sustancias orgánicas la acidez se define como la cantidad de KOH en miligramos que se requieren para neutralizar el aceite respecto a cada gramo de muestra.

Basket: Centrifugadora que separa mezclas binarias, para la presente investigación el lodo y sólidos es una fase, mientras que el aceite es la otra.

Beaker: Especie de recipiente de laboratorio, de forma cilíndrica con fondo plano, especial para mediciones rápidas y llevar a cabo diluciones.

BSW: Se refiere al contenido de agua y sedimento en el aceite, proveniente de las siglas en inglés "*Basic Sediment Water*". Su presencia es no deseada ya que disminuye el poder calorífico del combustible y además tiene impacto sobre los equipos en cuanto a suciedad.

Bunker C: Se refiere al combustible de uso industrial, proveniente de la primera etapa de refinado, viscoso, alto contenido energético, apto para calderas, hornos y plantas generadoras de electricidad.

Cal: La cal es el nombre común del óxido de calcio. Éste es un sólido blanco, extraído de tajos y ciertas zonas. Su uso en el presente proyecto es como un agente neutralizador gracias a sus propiedades básicas.

Cinética de reacción: Se define como cinética de reacción al comportamiento de la velocidad con que se trata el aceite sucio con ácido sulfúrico.

CIQPA: Por sus siglas se refiere al Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales Afines.

DFP: Se refiere a diagrama de flujo de proceso.

Dioxinas: Las dioxinas son compuestos químicos que se forman durante los procesos de combustión donde se involucre cloro, son sustancias muy controladas por parte del Ministerio de Salud en calderas y equipos de éste tipo, ya que las mismas se consideran persistentes y tienen efectos cancerígenos sobre la salud humana.

Fuerza motriz: Se define fuerza motriz como al fenómeno o actividad que impulsa una operación unitaria, puede ser por ejemplo la fuerza gravitacional en un sedimentador o la fuerza centrífuga en una centrifugadora.

Furanos: Al igual que las dioxinas los furanos son sustancias muy controladas hoy en día por su efecto tóxico y cancerígeno, puede generarse durante la combustión, presenta aromaticidad lo cual lo torna una sustancia de mayor cuidado por su estabilidad.

H₂SO₄: Compuesto químico llamado ácido sulfúrico. Se encarga de tratar el aceite usado para separar los metales pesados del mismo y romper enlaces organometálicos.

IFO: Mezcla de aceites conocida por sus siglas en el inglés como “Intermediate fuel oil” que se emplean para dar lubricidad en los motores de los barcos.

ISO: Organización internacional de la estandarización.

KOH: Compuesto químico llamado Hidróxido de potasio. Empleado para medir la acidez del aceite usado mediante una valoración potencio métrica.

Lodo Ácido: Concepto creado en el presente proyecto para todos los desechos de ácido sulfúrico y lodos separados que contienen un contenido alto en metales pesados.

MSDS: Hoja de seguridad de un producto o sustancia química.

OH: Radical libre que hace referencia a los hidróxidos, comportamiento básico.

P.T.S.: Partículas sólidas totales en el aceite. Se hacen análisis de P.T.S y es ahí donde se determina el contenido de metales pesados de las muestras de aceite usado o tratado.

PCBs: Por sus siglas en inglés se traduce a Bifenilos Policlorados, los cuales son contaminantes orgánicos persistentes, que por ende son de cuidado ambiental y para la salud pública.

RCF: Por sus siglas en inglés se refiere a la fuerza centrífuga relativa. Este valor es crítico a la hora de centrifugar un aceite usado.

Reacción de Limpieza: Se define reacción de limpieza en el presente proyecto de graduación, como la interacción entre el ácido sulfúrico y el aceite usado, donde se da la descomposición de componentes organometálicos, así como la separación de los componentes polares, por ende es la suma de una serie de reacciones donde lo que se hace es limpiar el aceite mediante un tratamiento con ácido.

TIR: Parámetro económico que se emplea para medir la rentabilidad de un proyecto para una cierta cantidad de años, se le conoce como Tasa Interna de Retorno. Se representa en porcentaje y debe ser superior al 14 %, ya que, de no ser así, el dinero invertido tiene mayor retorno estando en el banco.

Tri-decanter: Centrifugadora capaz de separar en tres fases distintas la mezcla aceitosa, lodo, sólidos y aceite.

VAN: Parámetro económico que se emplea para medir la rentabilidad de un proyecto para una cierta cantidad de años, se le conoce como Valor Actual Neto. Este parámetro debe ser positivo y lo más grande en magnitud posible, ya que de ser negativo implica pérdidas.

1. EL ACEITE USADO.

Un aceite usado es un desecho que se genera en la operación diaria de maquinarias, equipos, barcos, flota automotriz e industria en general, el cual se considera de carácter tóxico y calificado como peligroso. Este representa un riesgo para la salud humana y el medio ambiente (agua, suelo, aire, plantas y animales). Se considera de tal manera debido a que los aditivos adicionados al aceite para promover una estabilidad ante la oxidación, mantener la viscosidad ante cambios de temperatura, brindar propiedad detergente a los lubricantes, entre otras, son sustancias de carácter tóxico y peligroso. Algunos de estas sustancias contaminantes presentes en el aceite usado son compuestos aromáticos, hidrocarburos halogenados, sólidos debido al desgaste de motores o equipo industrial donde fueron empleados, cenizas, polvo, hollín, solventes clorados, tensoactivos y compuestos organometálicos. Estos últimos son de gran importancia en el aceite ya que son aditivos que le dan propiedades de estabilidad y lubricidad al mismo. Sin embargo, una vez descompuestos generan metales pesados, como zinc, bario, plomo, aluminio, entre otros; los cuales son sustancias nocivas para la salud humana (Pöler, Mödler, Brunhke, & Hindenberg, 2005).

Según el congreso el nacional del medio ambiente llevado a cabo en Argentina en el año 2008, un aceite usado se define como: *“aceite con base mineral o sintética destinados para lubricar y que se hayan vuelto inadecuados para tal fin”* (CONAMA, 2008). A partir de la definición anterior se puede referir a un lubricante como residuo, cuando este deja de ser útil debido a que sus aditivos se han descompuesto y han perdido sus propiedades para el uso que fueron creados. Algunos ejemplos son los aceites usados provenientes de automóviles, barcos, aviones, locomotoras, maquinaria pesada y otros más.

La palabra aceite es un término general, por lo tanto, se delimita para este informe a aceites derivados del petróleo y aceites sintéticos, los cuales forman la base del aceite. Las composiciones de estos varían de acuerdo a su uso y a su naturaleza, en general la composición está dada por compuestos saturados como alcanos, parafinas, ciclo alcanos, ceras, además de compuestos aromáticos, resinas y asfaltenos (Fingas, 2012).

Cabe destacar que la delimitación anterior se hace con el fin de no confundir un aceite usado con otras sustancias que tienen propiedades similares, como por ejemplo los fondos de los tanques de almacenamiento de aceite virgen, los anticongelantes, el queroseno, el aceite vegetal y animal, ni los destilados que sirvan como solventes.

Por otra parte, es importante clasificar los aceites de alguna manera, una de estas es según su uso. Por ejemplo, los utilizados en automóviles a gasolina, diesel, otros dedicados a las cajas de tracción y no a motores específicamente. Por otra parte, también están los IFO que se utilizan en los motores de los barcos y el cual es el que se desea recuperar en este proceso (Fingas, 2012).

Los aceites se clasifican también de acuerdo a su viscosidad, por ejemplo, existen normas SAE, ASTM y API que los diferencian. La metodología que más se emplea hoy en día es la SAE, la cual se basa en diferenciar su grado de viscosidad, manejan los grados 0W, 5W, 10W, 15W, 20W, 25W, 30, 40, 50 y 60. Cada una de estas tiene diferentes aplicaciones, en general los motores emplean el grado 40, el cual tiene una viscosidad entre los 12,5 y 16,3 mPa·s (SAE International, 2015).

Como se mencionó anteriormente, el presente informe se delimitará a tratar los aceites residuales de los barcos, dicho residuo en cuestión presenta dos posibles aprovechamientos. La primera opción es recuperar la base del aceite, con el fin de volver a obtener un lubricante nuevo una vez que se le agregan sus aditivos. La segunda opción, es aprovechar dicho residuo con el fin de obtener un combustible, ya que presenta un poder calorífico comparable con el Búnker C (Pöler, Mödler, Brunhke, & Hindenberg, 2005).

Para llevar a cabo cualquier proceso, en donde se pretenda aprovechar dicho residuo, es de suma importancia conocer la cantidad de agua, lodo, sedimento y metales pesados presente en la materia prima. Además, cabe destacar que dicha sustancia en cuestión presenta gran variabilidad, debido a que el contenido de contaminantes entre un buque y otro puede cambiar bastante, por lo tanto, debe realizarse un muestreo altamente representativo y brindar un porcentaje de seguridad alto a la hora de caracterizar estas sustancias (Montes, 2003)

La materia prima del proyecto que se usó para llevar a cabo la presente investigación, es proveniente de los barcos que arriban al muelle de Moín, Limón, Costa Rica. Para dicho fin se contactó a la empresa “Acarreos y Servicios S.A.” Dicha industria le brinda el servicio de

recolección de hidrocarburos residuales a muchas empresas que desembarcan o cargan sus productos en dicho sitio, algunas de estas son: *“Dole Food Company”*, *“Chiquita Brands International”*, entre otras.

Otro aspecto a considerar es la importancia ambiental de tratar estos desechos, ya sea para su eliminación o bien, reaprovechamiento. Existen convenios entre países, normas y legislaciones que establecen controles y medidas para lo que es el manejo y el movimiento transfronterizo de estos desechos. Entre las legislaciones nacionales se encuentra la Ley de registro, ingreso, etiquetado y control de productos peligrosos. Un convenio internacional que toca dicho tema y del cual Costa Rica forma parte es el Convenio de Basilea, por ende, a continuación, aparece una reseña de algunos aspectos importantes del convenio y de la ley anteriormente mencionada.

1.1. Convenio de Basilea.

Costa Rica forma parte del Convenio de Basilea, sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. Este convenio tiene como objetivo primordial proteger la salud de las personas y del medio ambiente, frente a los efectos perjudiciales de aquellos desechos que son peligrosos (PNUMA, 2009).

El convenio cita varios aspectos importantes, en primera instancia, el movimiento de estos desechos peligrosos a los países en desarrollo encierra un alto riesgo en cuanto a lo que es su manejo ambiental y eficiente, por otra parte, comenta acerca de la necesidad de crear conciencia y de llevar a cabo un tratamiento correcto de éstos, en donde sea compatible con la salud humana y con el medio ambiente (PNUMA, 2009).

Dicho convenio también cita, que todo estado puede prohibir la entrada de estos desechos. Sin embargo, en caso de permitirse la entrada de éstos, debe hacerse una conciencia en seguir desarrollando y aplicando tecnologías ambientalmente racionales, con buenas medidas de reciclaje, reutilización y el correcto tratamiento para la eliminación de los desechos peligrosos (PNUMA, 2009).

Una ventaja de dicho convenio es que presenta una estrecha colaboración con otros como el de Estocolmo y el de Rotterdam, el primero acerca contaminantes orgánicos persistentes y el segundo sobre procedimientos de consentimiento relativos a plaguicidas y productos químicos. Lo cual hace que en la actualidad se busquen nuevas formas de actuar, el último convenio se realizó en el 2009, en Suiza, y se fomentó acerca buscar nuevas estrategias y métodos, con el fin de darle solución al problema de los desechos y a la vez reaprovecharlos o bien reciclando éstos (PNUMA, 2009).

Dentro de lo que sería el Convenio de Basilea, las sustancias peligrosas están separadas por categorías, se tienen 47 categorías de desechos que deben tratarse y hacer conciencia sobre su impacto al medio. El aceite usado se encuentra en la categoría Y9 del convenio, la cual hace referencia a mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua (PNUMA, 2009).

En vista que en el muelle de Moín, Limón, Costa Rica; se brinda el servicio de recolección del lubricante utilizado en los barcos, es que se pretende diseñar un proceso con el fin de aprovechar energéticamente o bien reutilizar el mismo. Debido a que actualmente se buscan nuevas opciones de energía, por la alta dependencia de los hidrocarburos tradicionales, resulta una alternativa utilizarlo como combustible. De esta manera se colabora con el convenio, ya que se le obtiene provecho energético y a la vez se le da tratamiento a un desecho que se considera de carácter peligroso para la salud humana y el medio ambiente.

1.2. Reglamento para el registro, importación, etiquetado y control de productos peligrosos.

Dicha ley considera la función del estado en promover la salud humana de los ciudadanos, por ende, el Ministerio de Salud tiene la función de definir las sustancias que se consideran de carácter tóxico, peligroso, material radioactivo, inflamable, corrosivo, irritante u otra naturaleza. Por ello dicta las medidas a seguir por las empresas que empleen o produzcan sustancias de esta índole, y

así otorgarle permisos de ubicación y funcionamiento (MINAET; MIDEPLAN; Gobierno de la República, 2010).

En primera instancia se comenta que únicamente se permite el manejo de productos peligrosos a los que se encuentren debidamente inscritos ante el Ministerio de Salud. La vigencia de dicho registro se da por cinco años, la misma puede ser eliminada si el representante legal así lo solicita o bien si hay algún incumplimiento con las disposiciones legales pertinentes.

El aceite usado se clasifica dentro del tipo de sustancias tóxicas debido al contenido de metales pesados y sustancias nocivas para la salud humana y el medio al estar en contacto con los mismos, los cuales se encuentran dentro de la categoría 6. Cabe destacar que en los anexos del mismo se dice que para presentaciones inferiores a 1 litro, sin embargo, para una planta procesadora del mismo, si debe de inscribirse el producto (MINAET; MIDEPLAN; Gobierno de la República, 2010).

En el reglamento se presente una hoja de seguridad con el formato mínimo que debe de presentarse del producto inscrito, la cual se hace llamar MSDS y sigue el formato ISO. Entre la información que debe de llevar el producto están dividida en secciones, la primera sección contiene: nombre del producto, tipo, marca, compañía fabricante, ubicación, número de teléfono, uso del mismo. La segunda sección sobre la composición de los productos peligrosos. Una tercera sección sobre identificación de riesgos y efectos por explosión. La cuarta sección comenta acerca los primeros auxilios. Una quinta sección de medidas contra fuego. La sexta sobre medidas en caso de fuga o derrame. La séptima sobre la manipulación y el almacenamiento que se le dé. Una octava sección sobre control y equipo de protección personal. La novena sección sobre propiedades físicas y químicas del producto. La décima sección sobre estabilidad y reactividad del producto. La onceava sección trae la información acerca toxicología. La doceava sobre efectos ecológicos del mismo. La treceava sección es acerca la disposición final del producto. La décima cuarta zona es relevante al transporte. Mientras que la décima quinta se refiere a la información regulatoria. Por último, una sección que se refiere a otra información, en caso de algún tema que no se vea abarcado en las secciones anteriores.

Por último, entre las regulaciones que se tienen está el etiquetado del producto, en éste caso se maneja vía cisterna, por ende, las mismas deben de cumplir con lo que se solicita para el transporte de combustibles en el país y con la inscripción correspondiente de los transportistas.

2. PROBLEMÁTICAS DEL ACEITE USADO.

Según el Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL), en un estudio realizado, plantean que tanto para la obtención de la base del aceite, como para el aprovechamiento como un aceite combustible, se debe tener conciencia de la gran variabilidad de contaminantes presentes en dicho residuo, además resalta la importancia de caracterizar la materia prima antes de entrar al proceso (CAR/PL, 2001).

Entre los contaminantes que se tienen en un desecho de esta índole según el CAR/PL están: hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos clorados, metales como bario, aluminio, plomo, cromo y zinc, ácidos inorgánicos, derivados de cloro, azufre, nitrógeno y otros compuestos orgánicos como los aldehídos (CAR/PL, 2001).

La presencia de los componentes anteriormente mencionados, es la razón por la cual el residuo que se desea aprovechar se considera de carácter tóxico y peligroso, ya que el contacto de esos desechos podría afectar tanto la salud de las personas como al medio. A continuación, se presenta un resumen de los dos aspectos principales, que son una problemática para el diseño de la obtención de un producto a partir de aceites usados. Primero el contenido de metales pesados y luego la fracción de agua y sedimento en las muestras.

2.1. Contenido de metales pesados y otros contaminantes en los aceites usados.

Un buen aceite lubricante presenta entre un 15% y un 20% de aditivos, los cuales son en gran parte compuestos organometálicos, encargados de brindar propiedades al producto como lubricidad y estabilidad, algunos de estos al cumplir su vida útil se degradan generando metales pesados en el residuo. Por otra parte, los motores debido al desgaste y rozamiento de sus piezas internas también generan metales que se aglomeran en la mezcla residual a la cual se le desea

sacar provecho (Aguilar & Iza, 2009). Estos componentes anteriormente mencionados son un problema para el ambiente y para la salud humana, por ende, resulta necesario cuantificar su contenido y así poder dar un tratamiento adecuado a dicho residuo (Aguilar & Iza, 2009).

Por otra parte, los metales pesados no son convenientes en un combustible, ya que se depositan en las calderas, tuberías y equipos industriales, volviéndose necesario un mantenimiento más anticipado y la pérdida de la eficiencia del equipo. Generalmente se cuantifican en unidades de partes por millón (Espuglas & Chamarro, 2005).

Cabe destacar que los metales pesados y demás sólidos se encuentran en una zona específica del aceite la cual se conoce como P.T.S., estos hacen referencia a las partículas sólidas totales, por ende, para caracterizar el contenido de metales pesados en el lubricante usado, debe primero rescatarse todo el contenido de P.T.S. y luego estos son los que se analizan para determinar su contenido.

Para medir el contenido de metales pesados el método más común es la absorción atómica, la cual consiste en colocar la muestra en una llama calentada a alta temperatura, proceso en el que el analito experimenta una serie de transformaciones fisicoquímicas, los átomos en el estado no excitado absorben luz de la longitud de onda característica para cada elemento y promueven los electrones de valencia a estados excitados. Por consiguiente, la cantidad de luz absorbida es proporcional a la concentración de átomos del elemento en la llama, la cual, a su vez, es proporcional a la concentración del metal en la disolución (Alvarado & Barquero, 2008).

Otra opción con la cual se puede medir la cantidad de metales pesados es mediante una espectroscopía de masas, la cual es una técnica para estudiar las masas de los átomos, moléculas o inclusive fragmentos de éstas. Esta técnica se usa tanto cualitativamente como cuantitativamente mediante el espectro de absorción y es mediante los picos obtenidos que se obtiene la información deseada a partir de la intensidad de estos (Harris, 2007).

Otras sustancias que no son convenientes para el ambiente ni para la salud humana, que se encuentran en el aceite usado son todas aquellas sustancias o aditivos que se encargan de dar propiedades a los aceites de viscosidad, detergencia, filmicidad, lubricidad entre otras. Algunas de estas son los tensoactivos, los cloruros, PCB's y los órgano-metálicos.

En la sección que se muestra a continuación se resumen los aspectos más importantes a la hora de emplear un aceite combustible en un horno, con los cuales debe de cumplir la empresa que utilice el dicho producto en sus equipos. La misma hace referencia sobre los límites en emisiones y en contenido de metales pesados y otros contaminantes que deben ser considerados para cuidar tanto la salud humana como el medio.

2.1.1. Legislación nacional respecto a los metales pesados y otros contaminantes.

Tanto a nivel nacional como internacional existan regulaciones para medir y controlar posibles emisiones de metales pesados hacia el ambiente, así como para el tratamiento de los desechos que involucren la presencia de éstos.

Desde hace algunos años atrás ha habido preocupación por este asunto. Es por ello que se publicó en La Gaceta el 21 de junio del 2004 el decreto DE-31837 con los requisitos, condiciones y controles para la utilización de combustibles alternos en hornos cementeros (Ministerio de Salud; Presidencia de la República, 2004).

En primera instancia se indica que, si alguna entidad o industria decide utilizar un combustible alternativo o una mezcla, debe solicitar el permiso al Ministerio de Salud, debe dar una razón social, el representante a cargo y una dirección de éste, con el fin de recibir las notificaciones pertinentes. Por otra parte, debe brindarse información general de la empresa y presentar un informe acerca de como se manejarán los residuos. También debe indicar como se almacenarían estos combustibles antes de su aprovechamiento térmico. Además, debe darse un programa de contingencia en caso de derrames, fugas, emisiones, entre otras (Ministerio de Salud; Presidencia de la República, 2004).

Las industrias que empleen estos combustibles, como lo dice el artículo 10 del decreto DE-31837 debe brindar al Ministerio de Salud un análisis por mes del producto antes del aprovechamiento térmico de: metales, cloruros y PCB's. Y otro cada seis meses de chimenea posterior a su combustión de: monóxido de carbono, dioxinas, furanos y los óxidos de nitrógeno.

Trimestralmente se analizan hidrocarburos totales, dióxido de azufre y cloruro de hidrógeno. Una vez al año un análisis isocinético puntual de P.T.S. donde se determine el contenido de: cadmio, mercurio, arsénico, cobalto, selenio, níquel, manganeso, estaño, plomo, cromo, cobalto y zinc (Ministerio de Salud; Presidencia de la República, 2004).

En el cuadro 2.1 se muestran los parámetros establecidos por el decreto DE-31837 antes de alimentar el aceite combustible al horno. Por lo tanto, cabe destacar que si se desea llevar a cabo un proceso para su aprovechamiento térmico estos son los parámetros que dicho diseño debería considerar a medir en el producto final.

Cuadro 2.1. Límites de los análisis fisicoquímicos que se le deben hacer a los combustibles antes de ser empleados en un horno (Ministerio de Salud; Presidencia de la República, 2004).

Parámetro	Límite Máximo Permissible
Poder Calorífico; kcal/kg.	2 500 como mínimo
Halógenos (Cloro); % V/V.	2,0
Bifenilos pelliclorados; mg/L.	50
Cromo hexavalente; mg/L.	3 000
Arsénico; mg/L.	100
Plomo; mg/L.	4 000
Plaguicidas; mg/L.	5
Mercurio; mg/L.	50
Plata; mg/L.	100
Selenio; mg/L.	100
Cadmio; mg/L.	500
Sulfuros; % V/V.	1,0
Cloruros; % V/V.	2,0
Bario; mg/L.	6 000

Por otra parte, en el cuadro 2.2 se muestran los parámetros y límites respectivos a los análisis que se le deben de hacer a las chimeneas donde se empleen estos combustibles, con el fin de regular las emisiones. Ya que, en caso de desearse emplear dicho combustible, el horno, caldera o equipo industrial debe garantizar al menos estos parámetros y así estar en regla con la legislación, con la salud humana y con el ambiente en general. Cabe destacar además que de no cumplirse con algún parámetro existen diferentes medidas a tomar por parte del Ministerio de Salud, que van desde multas, cierres de plantas hasta lapsos de tiempo para corregir el inconveniente.

Cuadro 2.2. Parámetros y límites de emisiones de los hornos que empleen combustibles alternos (Ministerio de Salud; Presidencia de la República, 2004).

Parámetro	Límite Máximo Permissible
Partículas; mg/m ³	30
CO; mg/m ³	630
SO ₂ ; mg/m ³	700
NO _x ; mg/m ³	800
HCl; mg/m ³	70
Cd y Hg; mg/m ³	0,28
As, Sn, Se y Ni; mg/m ³	1,40
Pb, Cr y Zn; mg/m ³	7,00
HCT (expresado como metano); mg/m ³	70
Dioxinas y furanos; ng/m ³	0,20

Es importante aclarar que en el cuadro 2.2 aparecen algunos grupos, por ejemplo, se permiten 0,28 mg en un metro cúbico de la suma de cadmio y mercurio. Cabe destacar que todos los valores deben de estar referidos a condiciones estándar (temperatura de 25 °C y presión de 101,3 kPa). Por último, si se piensa emplear una mezcla mayor al 5 % del combustible alternativo junto con Búnker C, se deben de presentar pruebas de protocolo de quemado a la Dirección de Protección de Ambiente Humano (Ministerio de Salud; Presidencia de la República, 2004).

Otros puntos con los que la empresa debe contar son los diagramas de flujo de proceso aprobados por el Colegio de Ingenieros Químicos y Profesionales Afines, así como los requisitos que deben cumplir los transportistas del combustible (Ministerio de Salud; Presidencia de la República, 2004).

2.2. Contenido de agua y sedimento básico en el aceite residual.

El parámetro para cuantificar el contenido de agua y sedimento básico se le conoce como BSW, el cual es una fracción de volumen de agua y de sedimento básico presente en una muestra (Marfisi & Salager, 2006). La palabra agua y sedimento básico se refiere en el tema de hidrocarburos al agua salada, arena, carbonatos, lodos, productos de corrosión y de precipitación. Una gran cantidad se encuentra libre y se puede separar con ayuda de la gravedad, mientras que otra

cantidad está ligada o bien emulsificada y requiere métodos más complejos para separarla (Marfisi & Salager, 2006).

Es importante determinar este parámetro al inicio de un proceso y al final del mismo, ya que dicho dato debe ser lo más bajo posible, debido a que disminuye notablemente el poder calorífico del combustible. Además de que el sedimento puede ocasionar atascamientos y otros problemas de esta índole durante su almacenamiento en un tanque o bien su trasiego (RECOPE, 2011). Para medir el contenido acuoso se manejan tres metodologías, una basada en la centrifugación, otra que se lleva a cabo mediante una destilación y una tercera opción basada en una reacción conocida como Kart-Fisher (Marfisi & Salager, 2006).

La norma ASTM D-1796, especifica cómo medir el contenido de agua y de sedimento en un aceite residual. Dicha prueba consiste en la utilización de la fuerza centrífuga y posteriormente medir la altura de la fase acuosa en un embudo con fondo cónico (ASTM, 2013). Para dicho método basado en la fuerza centrífuga relativa, lo que se hace es colocar muestras de igual tamaño en direcciones opuestas dentro de una centrifugadora, se mide la altura del BSW y se repite hasta que dicho valor no varíe en dos ocasiones consecutivas. En la sección de anexos se resume esta metodología completamente. En algunas ocasiones donde se puede complicar la determinación del BSW mediante el método ASTM D-1796, la norma propone el método estándar ASTM D-96 que hace uso de una destilación. En última instancia se propone otra alternativa mediante una extracción la cual corresponde a la metodología ASTM D-473 (ASTM, 2013).

Un aceite residual de barco presenta un BSW alto, con valores que pueden alcanzar hasta un 30 %, éste va a variar por el tipo de materia que es, como se almacene, como se descargue, entre muchos otros factores que dependerán del barco en sí (Chávez & Navarrete, 2012).

2.2.1. Legislación nacional para el vertido de aguas residuales provenientes del procesamiento de aceites.

El decreto DE-33601-MINAE-S se publicó en la Gaceta, en el año 2007 trata sobre el reglamento para el vertido y rehúso de aguas residuales. En el cuadro 2.3 se muestra un resumen de los

parámetros más relevantes en el reglamento de vertido de aguas. Estos valores corresponden al procesamiento de aceites, ya que el decreto brinda la información de acuerdo a su actividad (Presidencia de la República; Ministro de Ambiente y Energía; Ministra de Salud, 2007).

Cuadro 2.3. Parámetros para vertido de aguas según el decreto DE-33601-MINAE-S (Presidencia de la República; Ministro de Ambiente y Energía; Ministra de Salud, 2007).

Parámetro	Límite Máximo Permissible
DBO _{5,20} ; ; mg/L	150
DQO; ; mg/L	300
SST; mg/L	100
Grasas/Aceites; mg/L	30
Sólidos suspendidos; mg/L	50
Potencial hidrógeno; Adimensional	5 a 9
Temperatura; °C	De 15 a 40
Sustancias activas al azul de metileno; mg/L	5
Sólidos sedimenta; mL/L	1
Mercurio; mg/L	0,01
Aluminio; mg/L	5
Arsénico; mg/L	0,1
Bario; mg/L	5
Cadmio; mg/L	0,10
Cloro Residual; mg/L	1
Color (Pureza); 15 %	15
Boro; mg/L	3
Cromo; mg/L	1,50
Cianuro total; mg/L	1
Cobre; mg/L	0,50
Plomo; mg/L	0,50
Estaño; mg/L	2
Fenoles; mg/L	1
Fosfatos; mg/L	25
Nitrógeno total; mg/L	50
Níquel; mg/L	1
Zinc; mg/L	5
Plata; mg/L	1
Selenio; mg/L	0,05
Sulfitos; mg/L	1
Sulfuros; mg/L	25
Fluoruros; mg/L	10
Hidrocarburos; mg/L	10
Sumatoria de órgano-fosforados; mg/L	0,10
Sumatoria de carbonatos; mg/L	0,10
Sumatoria de órgano-clorados; mg/L	0,05

El parámetro $DBO_{5,20}$ se refiere a la demanda bioquímica de oxígeno, el DQO sería la demanda química de oxígeno, SST se refiere a sólidos suspendidos totales. Cabe destacar que en el cuadro 2.3 se presentaron todas las sustancias, el ente encargado de indicar cuales análisis realizar es el ministerio de salud, en general los parámetros universales de análisis obligatorio son el caudal, la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno, el potencial de hidrógeno, grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sustancias activas al azul de metileno y la temperatura (Presidencia de la República; Ministro de Ambiente y Energía; Ministra de Salud, 2007).

3. PRODUCTOS A PARTIR DE UN ACEITE USADO.

Como se comentó en el capítulo 1, que a partir del aceite negro que se tiene, se pueden obtener dos productos distintos según su uso, el primer caso es un combustible destinado para el aprovechamiento térmico, mientras que el segundo es la regeneración o bien recuperación de la base del aceite para volver a obtener lubricantes. (Montes, 2003). En este tercer capítulo se hará una reseña de cada uno de estos productos, sus características y propiedades que deben cumplirse para catalogarse como tal.

3.1. Aceite Combustible:

En el ámbito de aceites combustibles se manejan dos alternativas, las cuales dependen, básicamente, de la capacidad del horno en la que se empleará. Una opción es la eliminación del agua y algunos sedimentos fáciles de separar mediante un drenado con el fin de aprovechar su poder calorífico en hornos de alta envergadura, donde se manejan temperaturas de operación superiores a los mil doscientos grados Celsius, y el tiempo de residencia es alto, de al menos una hora, por ejemplo, las cementeras. Es importante resaltar que si no es un horno de esta índole no se debe emplear dicho aceite como combustible, ya que la presencia de metales pesados y otros componentes no están siendo tratados (García, 2011).

Otra alternativa es la obtención de un combustible de uso apto para calderas, en donde se deben eliminar todos los desechos sólidos, entre ellos los metales pesados presentes en la muestra y el contenido de agua y sedimento, ya que estos podrían acarrear problemas de suciedad, eficiencia, e incrustaciones a los equipos en un futuro. En este caso la comercialización del producto obtenido se ve favorecida ya que su calidad es mucho más alta que la citada anteriormente para combustibles de uso en hornos de uso directo (García, 2011).

Estos combustibles presentan varias ventajas respecto al búnker C, pues contienen un grado menor de contaminación ya que el contenido de azufre, cloruros y nitrógenos es inferior. Además, presentan un mayor rendimiento calórico. También presenta desventajas respecto al producto anteriormente mencionado, como es el punto de inflamación y el inconveniente técnico a la hora de operar el mismo (Montes, 2003).

Por otra parte, existe una norma que nació con el fin de brindar especificaciones estándar para los aceites combustibles, esta es la ASTM-D396. La norma divide los aceites combustibles en 6 categorías de acuerdo al uso que se le vaya a dar a estos. En el cuadro 3.1 se resumen las especificaciones más relevantes que tienen los aceites combustibles según su categoría en dicha norma (ASTM, 2014).

Cuadro 3.1. Especificaciones de los Aceites Combustibles (ASTM, 2014).

Propiedad	No 1. S5000	No 2. S5000	No 4. Liviano	No 4. Pesado	No 5. Liviano	No 5. Pesado	No 6.
Punto de Inflamabilidad, °C min.	38	38	38	55	55	55	60
Agua y Sedimento, %v/v, max.	0,05	0,05	/	/	/	/	/
Temperatura de Destilación, °C, max.	288	338	/	/	/	/	/
Viscosidad cinemática a 40 °C, mm ² /s.	1,3 a 2,4	1,9 a 4,1	1,9 a 5,5	>5,5	/	/	/
Residuo de Carbón Ramsbottom, %m/m, max.	0,15	0,35	/	/	/	/	/
Ceniza, %m/m, max.	/	/	0,05	0,10	0,15	0,15	/
Azufre, %m/m, max.	0,05	0,05	/	/	/	/	/
Punto de Fluidez, °C, max.	-18	-6	-6	/	/	/	/
Densidad, kg/m ³ , max.	850	876	/	/	/	/	/

Las categorías 1 (S5000), 2 (S5000), 4 (liviano o pesado), 5 (liviano o pesado) y 6; varían de acuerdo a los requerimientos que se puedan tener ya sea por el contenido de azufre con el que se puede operar, o el contenido de agua y sedimento en la muestra, sin embargo, lo más relevante es caer en alguna de dichas categorías, de acuerdo a lo que se requiera. Sin embargo, según la norma se pueden utilizar aditivos, si se requiere disminuir o mejorar aún más una propiedad para poder emplear el aceite combustible en los equipos. Cabe destacar que según esta regulación se puede mezclar el aceite combustible con un máximo de 5% v/v de biodiesel u otro combustible para que la norma sea aplicable (ASTM, 2014).

3.2. Aceite Base.

La base de un aceite es el componente mayoritario en un lubricante, un aceite virgen corresponde a 100 % aceite base, o sea sin aditivos. Mientras que los demás lubricantes varían de acuerdo, a la cantidad de aditivos adicionada, esta puede variar desde un 1 % hasta un 30 % en su formulación. Entre más cantidad de aditivos contenga un aceite, más costoso va a ser éste. Se dice que un buen aceite contiene entre 15 % y 17 %, eso dependerá para el uso que sea este (Mang, 2007).

Obtener este producto a partir de un aceite residual implica un proceso más complejo y de mayor inversión económica, ya que la tecnología que se requiere implementar en dicho caso involucra operaciones como destilación al vacío y etapas posteriores de purificación muy costosas, sin embargo, al recuperar la base del aceite se podría cargar nuevamente con aditivos y emplear en un motor como si fuese nuevo (Beasley, 2006).

Las bases de aceites se clasifican en dos tipos: a) Las nafténicas, que carecen de la presencia de ceras, por ende, no se torna necesario un proceso de desencerado posterior, las caracteriza la presencia de aromáticos y ciclo parafinas. b) Las parafínicas, las cuales vienen siendo las que contienen ceras, por ende, sí requieren de un procedimiento posterior para desencerar el producto, las caracteriza la presencia de n-parafinas e i-parafinas (Lynch, 2008).

Otra clasificación que se tiene para las bases es en minerales y en sintéticas, las minerales también se conocen como convencionales, presentan índices de viscosidad de 95 o inferiores; mientras que las sintéticas más bien presentan índices de 100 o superiores (Lynch, 2008).

A continuación, se resumen algunas de las características que presentan los aceites base.

Viscosidad:

Es clave en la formulación de un lubricante, ya que determina que tan fluido es este, la viscosidad del aceite es de suma importancia en un motor, un buen grado de la misma implica que se genere una buena capa de lubricación entre las piezas del motor, logrando que las partes no se dañen y que la fricción no sea ni muy baja ni excesiva. Las unidades que usualmente se usan son los centistokes (cSt) algunos aceites van de 3 a 20 cSt y otros más viscosos van de 30-34 cSt (Lynch, 2008).

Volatilidad:

Determina la pérdida de aceites debido a su evaporación, para ello se usa la destilación cromatografía gaseosa, GCD, la cual es un indicador de volatilidad (Beasley, 2006).

Densidad y Grados API:

Los grados API son una medida de la densidad muy utilizada en la industria petrolera y se usan para decir que tan pesado o liviano es el petróleo, valores superiores a los 10 ° API quiere decir que es más liviano que el agua, es importante reconocer que la densidad aumenta con la viscosidad y esta última disminuye conforme aumenta la temperatura, conforme los niveles de isoparafinas decrecen la densidad también disminuye (Lynch, 2008).

Punto de Ecurrimiento y Punto de Niebla:

El punto de escurrimiento es la temperatura a la cual un fluido se convierte casi sólido, o bien deja de escurrir, un punto de niebla es la temperatura a la cual aparecen los primeros cristales, los puntos de escurrimiento típicos van de los -6°C a los -24°C tanto para sustancias livianas como pesadas.

Composición de Hidrocarburos:

Los compuestos que se prefieren para manufacturar bases son las isoparafinas que tengan bajos puntos de escurrimiento, por ende, las parafinas normales no son deseadas en ese proceso.

Color y Estabilidad:

El color y la estabilidad son medidas de la calidad de apariencia y del cambio en presencia de luz y calor, la prueba de conradson (CCR) mide las cenizas que se dejan posterior al quemado con una llama.

Azufre:

Entre más bajo sea el valor de Azufre mejor por aspectos ambientales, generalmente se encuentran en el ámbito de 500-600 ppm; para poder eliminar este se hace con solventes o hidrógeno (García, 2011).

4. EQUIPOS Y TECNOLOGÍAS.

En esta sección se describirán las principales tecnologías con las que se cuenta para llevar a cabo un proceso a partir de un aceite residual. En cada una de estas se resumirán sus ventajas y desventajas, con el fin de poderlas evaluar mediante una herramienta de selección en el capítulo 7 del presente escrito, para así determinar los equipos que mejor se ajustan a las necesidades en este caso.

Un proceso para obtener un combustible o un aceite base a partir del desecho en cuestión se caracteriza por contar con tres etapas, la primera es eliminar el agua libre, ya que su contenido es alto, la segunda sería el tratamiento al aceite residual donde se logren separar sus metales pesados y otros contaminantes, finalmente la tercera correspondiente a purificación y refinamiento. Ya sea un ajuste de pH, temperatura u otras características alteradas en el tratamiento anterior, con el fin de dejar el producto listo su uso (García, 2011).

En la figura 4.1 se representa un esquema tipo diagrama de bloques, con las etapas que se llevan a cabo desde el recibimiento del aceite residual, hasta el almacenamiento del producto final. Cabe destacar que antes de separar el agua, en su recepción se le hacen pruebas de calidad, para medir el contenido de agua y metales. Con el fin de ver si el tratamiento al que se someterá el aceite usado, cumple con los parámetros normales ya establecidos en el proceso. O en caso contrario verificar si se puede ajustar el proceso, para tratar el lubricante de desecho con el mismo proceso y cumplir con la legislación y condiciones mínimas.

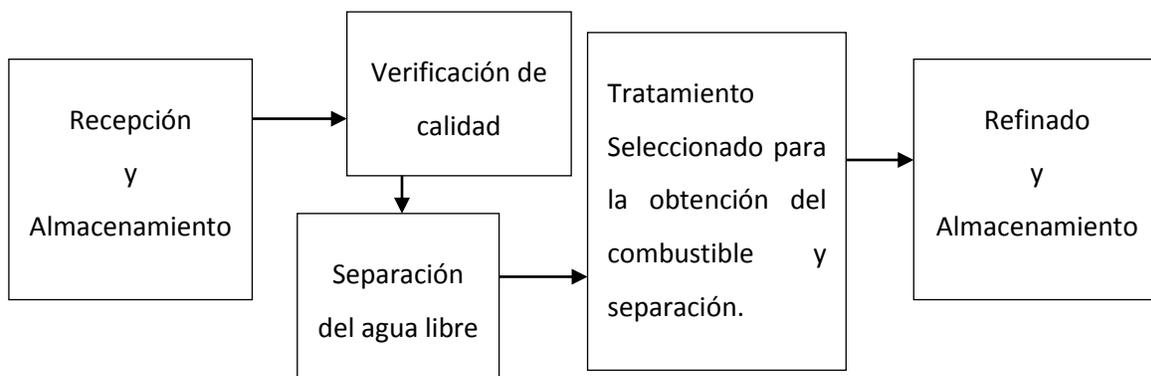


Figura 4.1. Diagrama de bloques del proceso global (Madrigal, 2015).

A continuación, se describirán las principales tecnologías disponibles para cada sección. Primero la eliminación de agua y sedimentos. Segundo el tratamiento seleccionado para remover metales y aditivos. Por último, el refinado a las cuales luego se le aplicará una herramienta de selección en el capítulo 7 del presente escrito, con el fin de compararlas y con ello seleccionar la que mejor se ajuste a las necesidades del proyecto.

4.1. Eliminación del Agua y Sedimento.

Para esta sección se tienen dos alternativas principales, una es la centrifugación y la otra es la sedimentación. A continuación, se describen ambas.

4.1.1. Centrifugación.

La centrifugación es una operación unitaria que puede separar dos líquidos, o líquidos de sólidos debido a la diferencia de densidad de estos al aplicar una fuerza giratoria sobre la mezcla. A la hora de diseñar una centrifugadora se define un término de acuerdo a las gravedades que se están implementando con ayuda de esta fuerza giratoria. Entre más grande sea la diferencia de densidad entre las sustancias que componen la mezcla, más fácil se va a dar la separación.

En cuanto al tipo de centrifugadoras que se tienen, para separar la mezcla de aceite residual, conformada por el aceite, lodo acuoso y partículas sólidas se rescatan las siguientes: a) Tipo basket. b) Tipo Tri-decanter. Estas se basan en que la primera tiene dos salidas, separando el aceite por un lado y el lodo por otro. Muchos sólidos se logran retirar en el lodo, mientras que otros se acumulan en las paredes y deben ser retirados cada cierto tiempo manualmente. En cambio, si la centrifugadora cuenta con tres salidas se conoce como Tri-decanter.

Por lo tanto, es importante analizar ambos casos, si el tiempo de limpieza manual afecta la producción, el método automático es una alternativa importante a considerar. Sin embargo, si no

es un impedimento, debido a que las etapas posteriores del proceso donde se implementará el equipo, presentan lapsos de tiempo de al menos 40 minutos, sin requerir utilizar la centrifugadora, no es una inversión necesaria.

El funcionamiento es el siguiente: el aceite contaminado con agua y sólidos entra de manera tangencial, los sólidos y componentes más pesados se retiran gracias al efecto de la fuerza centrífuga, mientras que el aceite se desplazaría a la etapa siguiente y el agua se desvía a otra salida donde se retirará del proceso. Todo esto gracias a la diferencia de densidades y el efecto de la fuerza centrífuga. En la figura 4.2 se muestra un esquema del funcionamiento anteriormente mencionado, para el caso de una del tipo tri-decanter.

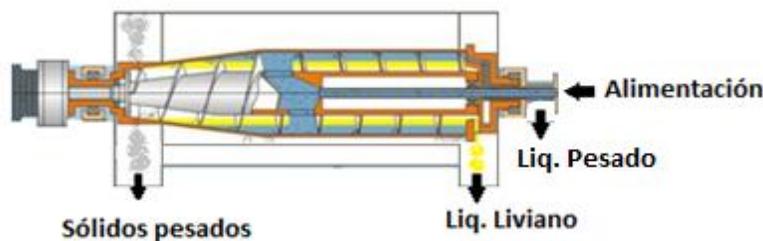


Figura 4.2. Diagrama del funcionamiento de una centrifugadora (Peng, 2014).

Este tipo de equipos funcionan solo si se tiene un contenido de sólidos entre el 1 % m/m y 5 % m/m; mayor a ese ámbito no se garantiza su funcionamiento. Por ende, la importancia de caracterizar la materia prima antes de ingresar en el proceso. Presenta la ventaja de ser fácil de operar, permite tener un proceso continuo (Peng, 2014).

La operación normal de una centrifugadora es rápida y económica, la limpieza y revisión periódica de acuerdo a lo establecido por el fabricante, es clave en su mantenimiento, puede ser bombeando agua, desengrasantes o solventes, para ello se recomienda revisar los materiales del equipo y los detalles de ésta aportados por el fabricante (Peng, 2014).

La centrifugación no garantiza la separación del agua emulsificada, ni elimina los organometálicos, por ende, el producto se podría utilizar únicamente en hornos industriales muy grandes o bien de uso directo y no así en calderas, lo anterior también se debe a que en dicho equipo no se eliminan los compuestos organometálicos del aceite y estos pueden afectar el funcionamiento de las calderas, causando incrustaciones y gastos energéticos mayores a lo usual (Peng, 2014).

El agua eliminada del aceite para poder verterla debe de enviada a algún tratamiento de aguas residuales, ya que usualmente estará cargada con grasas, aceites y otras sustancias, por lo tanto, es necesario cumplir con las especificaciones del cuadro 2.3 del presente informe (Presidencia de la República; Ministro de Ambiente y Energía; Ministra de Salud, 2007).

4.1.2. Sedimentación.

La sedimentación para eliminar las aguas libres del aceite residual, suele ser una operación lenta, debido a que se basa en la fuerza de la gravedad, esta puede acelerarse con la ayuda de algún polímero o bien un floculante, sin embargo, los costos de operación serían muy altos (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

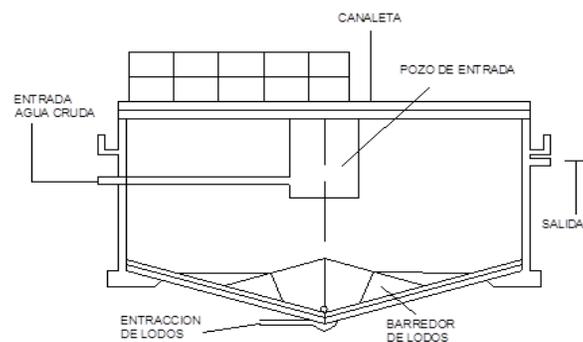


Figura 4.3. Diagrama de un sedimentador (UNAD, 2015).

El diagrama mostrado en la figura 4.3 muestra un sedimentador de flujo horizontal, el diseño y las dimensiones de este varían de acuerdo al contenido de agua y lodos que presente la materia en cuestión. La entrada de efluente al equipo se debe llevar a cabo con ayuda de un dispositivo hidráulico y manejar velocidades bajas, el valor máximo considerado se dice que es de 0,15 m/s. La salida del aceite por ser la sustancia más liviana, se lleva a cabo por medio de vertederos, se debe de considerar su viscosidad (UNAD, 2015).

Estos equipos suelen tener un tamaño grande, por lo tanto, presentan la desventaja de tener que contar con dicho espacio. El diseño de un sedimentador es especializado, lo cual eleva los costos

de implementación. Su operación es sumamente fácil ya que consiste en llenar el equipo y dejarlo actuar por un lapso determinado para su separación correcta. El nivel de separación de los componentes hace que sea complicado juntar para operar de manera continua. Su ámbito de purificación no es tan alto como una centrifuga ya que no hay efecto centrípeto, si no únicamente gravitacional.

El mantenimiento es relativamente bajo en costos ya que se basa en limpieza. Un inconveniente en este caso es la acumulación de lodos en los fondos y que debe de limpiarse entre cada tanda. En cuanto a la operación resulta muy complicado operar de una manera continua, sin embargo, se puede diseñar un sistema para ello (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

El producto obtenido con un sedimentador no ha sido tratado en cuanto a los metales pesados, además de la presencia de disolventes y agua emulsificada que no fue separada, por lo tanto, no debe ser considerado aún un aceite combustible, podría emplearse únicamente en hornos de alta envergadura, como lo son las cementeras, por ejemplo. Una vez limpiado el aceite del agua libre y otros contaminantes sólidos, esta debe de ser tratada con un sistema posterior de tratamiento de aguas residuales con el fin de poderla verter, ya que en el agua pueden quedar con algunas grasas, aceites y otras sustancias. Recordando que se debe de cumplir con las especificaciones del cuadro 2.3 del presente informe (Presidencia de la República; Ministro de Ambiente y Energía; Ministra de Salud, 2007).

4.2. Tratamientos al Aceite.

Para llevar a cabo el tratamiento del aceite sin agua libre y obtener un producto aprovechable se tienen 4 alternativas principales, estas son un tratamiento térmico para la evaporación del agua libre, uno con reacción química para la separación de metales pesados provenientes de los componentes órgano-metálicos, una destilación al vacío y una extracción con solvente con la misma finalidad que la reacción química, a continuación, se resumen cada una de ellas.

4.2.1. Evaporación por calentamiento.

La transferencia de calor se define como el flujo de energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas, la cual se puede dar por medio de tres mecanismos, que son: convección, conducción y radiación (Espuglas & Chamarro, 2005).

Un método para tratar el aceite residual se basa en la transferencia de calor mediante el empleo de un sistema horno- evaporador. Dicho proceso debe ser capaz de eliminar por evaporación el agua presente en el residuo. Debe de contar con un sistema de agitación y tener una eficiencia alta en el contacto de dicha operación. La temperatura de trabajo no puede exceder los 170 °C debido a que algunos compuestos orgánicos podrían sufrir descomposiciones, lo ideal sería operar cerca de los 100 °C con el fin de permitir únicamente la evaporación del agua (Ramírez J. , 1994).

En cuanto a su operación, solo se puede tipo lote, donde ingresa toda la masa de mezcla residual y se le hace pasar energía por medio de vapor, proveniente de una caldera, hasta alcanzar el cambio de fase, donde se evapora el agua del aceite de desecho, se debe contar con algún sistema capaz de permitir el descarte de dicho vapor. La contaminación en esta operación es alta, ya que se pueden arrastrar partículas orgánicas y de metales en la evaporación. Posterior a su descarte debe hacerse uso de un condensador para transformar el vapor en agua líquida, la cual no puede verterse directamente, ya que debe analizarse sus propiedades y temperaturas para proceder con el vertido según la ley nacional (Presidencia de la República; Ministro de Ambiente y Energía; Ministra de Salud, 2007).

El producto que se obtiene a partir de un proceso basado en un tratamiento térmico es apto únicamente para su utilización en hornos de alto calibre. En donde se manejen temperaturas altas y tiempos de residencia suficientes, debido a la necesidad de eliminar la presencia de metales pesados en el combustible, por ende, se considera de baja calidad.

Este método presenta varias desventajas, primero representa el uso de algún combustible para permitir la evaporación del agua, con lo cual se generan emisiones al ambiente y gastos de operación. Segundo el tiempo de operación suele ser alto, por ende, los costos de operación también. Tercero la calidad del producto obtenido es baja, debido a lo contaminado que se

encuentra, y como ya se mencionó anteriormente los contaminantes solo se concentran más al evaporar el agua y por lo tanto el aceite es apto para usarlo únicamente en hornos de uso directo. Por último la inversión que debe hacerse es alta ya que requiere de un condensador, bombas de trasiego, una caldera, instalaciones correctas y el horno capaz de evaporar (Montes, 2003).

4.2.2. Tratamiento químico.

Los tratamientos con reacción química para los aceites residuales se basan en romper los enlaces de los compuestos organometálicos y demás tenso-activos y aditivos presentes en los lubricantes. Esto se logra con un ácido concentrado y un buen sistema de homogenización (Montes, 2003). Por otra parte, se favorece la separación de los componentes polares como lo es el agua y lodo, así posteriormente con un sistema de separación de fases, se podría obtener el aceite en condiciones aptas para uso como combustible (Engel, Reid, & Hehre, 2006).

El uso de esta tecnología se basa en un reactor químico que sea eficiente en el contacto íntimo entre el aceite residual y un ácido altamente concentrado. También debe proveerse un sistema de separación posterior, en donde se separen la fase orgánica de la inorgánica. Se resalta la importancia de un diseño que optimice el contacto entre la mezcla y el reactivo, con el fin de minimizar el gasto de dicho insumo (García, 2011).

Los ácidos fuertes más comunes son el ácido clorhídrico y el ácido sulfúrico, en caso de emplearse esta tecnología la decisión radica en que aportar cloruros a la mezcla puede resultar un tanto más perjudicial en las futuras emisiones del combustible, ya que se puede favorecer la formación de dioxinas y furanos. Mientras que con los sulfatos va a ser un tanto más complicado que se queden en la fase orgánica. Al final del proceso el producto requiere de un ajuste de pH mediante una base y un tratamiento de refinado (García, 2011).

La descripción del proceso se observa en la figura 4.4; donde la materia prima ingresa al reactor, este se carga, luego se agrega un 10 % v/v respecto al aceite de ácido sulfúrico, se procede a iniciar la reacción, esta demora un lapso de una hora para garantizar la eliminación de sulfatos, aditivos y metales. Siempre y cuando sea un sistema de agitación efectivo, el cual puede ser un sistema por

lotes con las dimensiones estándar de un tanque de mezclado y una agitación para fluidos viscosos que no permita la formación de vórtices, ó bien un sistema mejorado para operar de manera continua con eficiencia alta en el contacto íntimo.

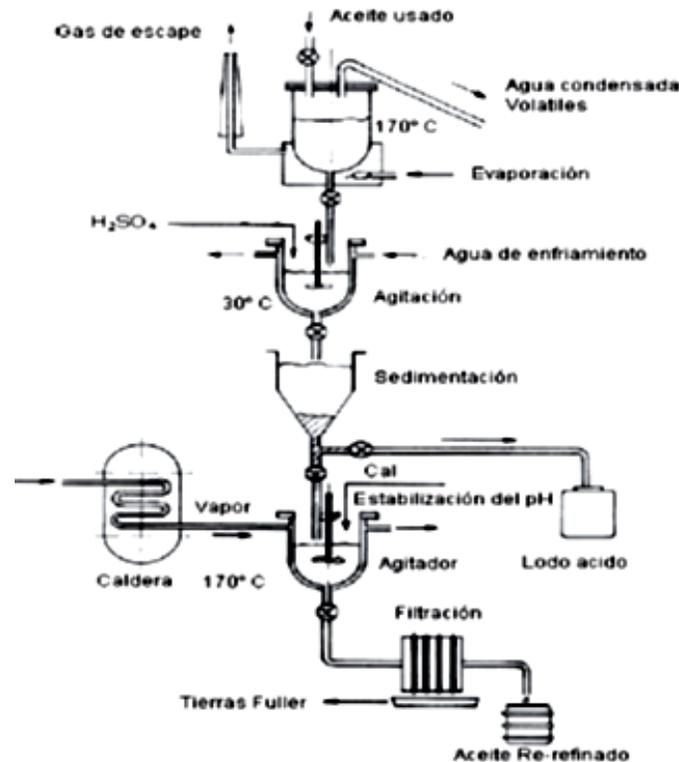


Figura 4.4. Diagrama del proceso con reacción química (Delgado & Parra, 2007).

La etapa de separación se aconseja que sea de al menos un día para que se dé una buena separación de fases en el sedimentador de fondo cónico. O invertir en una centrifugadora capaz de separar rápidamente los sólidos, la fase orgánica (el combustible) y la fase ácida con agua remanente desemulsificada. Finalmente, para que el producto quede listo para consumo, se debe estabilizar el pH y filtrar con arcillas, diatomea o tierras de Fuller, para descartar cualquier traza o impureza en el producto (Delgado & Parra, 2007).

La reacción como tal no ha sido estudiada en cuanto a su cinética de reacción, por ende en caso de querer optimizar este sistema, habría que iniciar por analizar cómo se puede medir, sin embargo debido a que la materia prima es muy variable, se suele mejorar el contacto íntimo con sistemas más avanzados de potencia, siempre manejando un factor de seguridad que garantice la

separación de metales pesados y demás sustancias, el cual está contemplado cuando se maneje un 10 % v/v de ácido sulfúrico respecto al aceite alimentado (Marfisi & Salager, 2006).

Entre las desventajas que cuenta el tratamiento reactivo mencionado en esta sección, se tiene el subproducto cargado con ácido, lodos, metales y demás suciedades. Por tanto, es importante pensar en este subproducto y su tratamiento antes de diseñar un método basado en tratamiento con ácido. Existen algunas posibilidades como lo es generar una pintura con dicha sustancia, reciclar el ácido ya que probablemente no esté agotado o bien proceder con su correcta eliminación (Delgado & Parra, 2007).

Entre las ventajas a destacar, los costos de operación son bajos, ya que la presión y temperatura son a condiciones naturales. Los costos de los equipos también se consideran bajos, ya que el reactor como tal puede ser un sistema formado en hierro, con un recubrimiento en fibra de vidrio, de manera que soporte el uso del ácido sulfúrico concentrado (Callister & Rethwisch, 2009).

La seguridad y capacitaciones que deben de hacerse a los empleados se basan en el uso de sustancias ácidas, ya que éstas presentan cierta peligrosidad al emplearlas. El mantenimiento de estos sistemas puede considerarse fácil y económico, ya que sería básicamente la limpieza de los equipos. En cuanto a la calidad del producto obtenido permite su uso en calderas y equipos de este tamaño, siempre y cuando se hagan los respectivos análisis para cumplir con la legislación y mezclar con ciertas cantidades de otros hidrocarburos para cumplir con la legislación nacional (Ministerio de Salud; Presidencia de la República, 2004).

4.2.3. Destilación al vacío.

En este proceso se obtienen diferentes fracciones base listas para adicionarle aditivos y utilizarlas como un lubricante nuevo. Por lo tanto, es una alternativa que puede usarse en la producción de otros aceites. Este proceso se lleva a cabo en cuatro etapas, la primera es un pre-tratamiento lo cual se logra con un decantado o centrifugado del aceite, en donde lo que se hace es eliminar de manera grosera el agua, lodos y otras partículas que no son de interés. Luego se utiliza ácido sulfúrico para llevar a cabo una limpieza de los aditivos y metales pesados, y se decanta. La tercera

etapa es la destilación al vacío para obtener la base del aceite. Y la cuarta que corresponde a un hidrotratamiento para dejar la base en condiciones listas para generar lubricantes nuevos (CAR/PL, 2001).

Desde el punto de vista del proceso para producir la mezcla de aceite residual, se procede a calentar a unos 110 °C por un tiempo adecuado, con agitación para eliminar restos de agua. Esto como etapa posterior al pre-tratamiento. Luego se procede a realizar la destilación al vacío, en donde se fraccionarán sus componentes de acuerdo a los puntos de ebullición de los mismos. Finalmente, para poder considerar dicha base de aceite como un producto de esta índole, hay que recurrir a decolorar la mezcla obtenida y tratarla con una hidrogenación. Este procedimiento mejora tanto la estabilidad, como la viscosidad de los aceites bases. Los fondos obtenidos en la destilación en esta sección son aceites que se pueden emplear como combustibles alternos, entonces no solo se obtiene la mezcla base si no también un subproducto combustible (Montes, 2003).

En la figura 4.5 se muestra un esquema del procedimiento para separar y purificar la base del aceite residual comentada en el párrafo anterior, de una manera más completa.

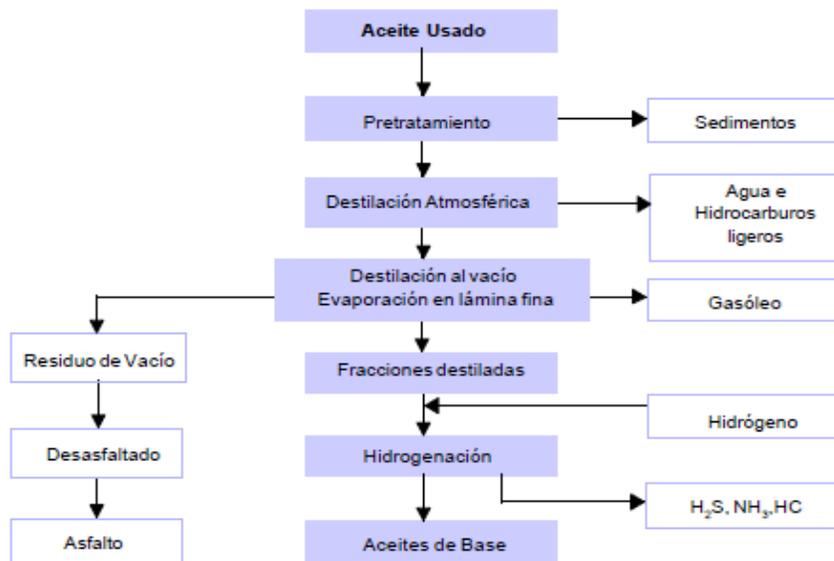


Figura 4.5. Diagrama del proceso para obtener un aceite base por medio de una destilación al vacío (CAR/PL, 2001).

Tal como se observa en la figura 4.6 el aceite usado ingresa al proceso, se lleva a cabo un pretratamiento donde se separan sedimentos, el pretratamiento se hace separando el agua con una sedimentación o centrifugación, luego se agrega ácido sulfúrico para eliminar metales pesados y solventes no deseados, por último, se hace un decantado para eliminar esos sedimentos. Luego del pretratamiento se hace una destilación atmosférica para separar agua e hidrocarburos ligeros. Siguiendo a esto se hace una destilación al vacío, de esta etapa se obtienen algunos gasóleos, los residuos o fondos de la columna pueden proceder a desasfaltar o bien utilizarse como combustible. Mientras tanto las fracciones destiladas de aceite base se llevan a un proceso de hidrogenación, donde se lleva a cabo un desencerado y el descarte de sustancias como H_2S , NH_3 y HC (CAR/PL, 2001). Una vez hecho esto la sustancia puede considerarse como un aceite base. La cual es la materia prima de todo lubricante, por ende, al cargarse con aditivos nuevamente puede emplearse en un motor (Montes, 2003).

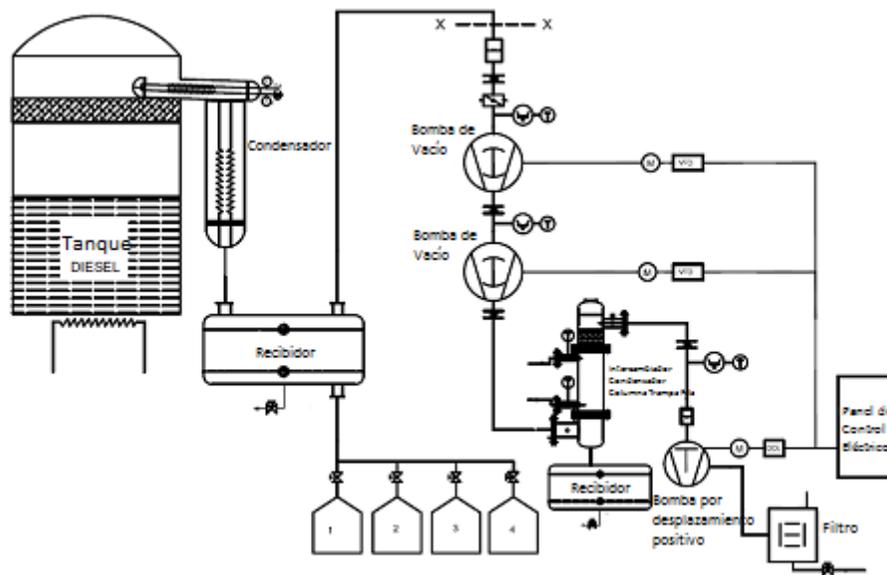


Figura 4.6. Diagrama de procesos para obtener un aceite base por medio de una destilación al vacío (Everest Blower Systems, 2007).

En la figura 4.6 se muestra un diagrama de flujo de proceso de un sistema de destilación al vacío por lotes, el cual lo vende la empresa "Everest Blower Systems" para tratar lubricantes. A una temperatura de 170-180 °C se separan fracciones ligeras. Una vez separados los livianos se inicia a generar vacío en el ámbito de 15-20 Torr. De esa manera se terminan de destilar sustancias livianas. Se procede entonces a encender una bomba de alto vacío que alcanza valores menores a

1 Torr. A una temperatura de 270 °C se tiene como producto principal el aceite base, este continua destilándose hasta el ámbito entre 300 y 320 °C. Cuando la temperatura inicia a subir el proceso puede darse por finalizado. El proceso como tal produce cerca de 6 600 litros en ocho horas con un consumo en Diesel de 75 litros (Everest Blower Systems, 2007).

La destilación a vacío se utiliza para poder llevar a cabo el fraccionamiento de las partículas de mayor peso en ese aceite, en donde la idea siempre es lograr alcanzar la viscosidad deseada. Esta separación se da gracias a esta operación unitaria y el ámbito de ebullición puede hacer más difícil o más fácil la última etapa del proceso, en donde se da el desencerado y acabado con hidrógeno. En esa etapa final el aceite se puede considerar regenerado y vender como base para otros lubricantes. Como ventaja se tiene el hecho que los desechos son muy bajos, sin embargo, siempre se cuenta con un desecho ácido proveniente del pretratamiento (García, 2011).

En cuanto a las condiciones de operación, por tratarse de una destilación a vacío los costos de estos equipos suelen ser altos. Se requiere de sistemas para generar vapor, brindar calentamiento, un re hervidor, un condensador y otra serie de equipos que suelen tener un precio elevado. El mantenimiento de las columnas para destilación es costoso, requiere detener el proceso, por el tipo de sistema, hay que hacer uso de una torre empacada, lo cual dificulta aún más el mantenimiento de los equipos (CAR/PL, 2001).

La calidad del producto que se obtiene es elevada, lo cual permite una remuneración económica alta, debido a que el aceite base es un producto más costoso que el aceite combustible, lo cual se debe a que son la materia prima principal de los lubricantes, donde únicamente se cargan nuevamente con aditivos y quedan listos para la venta.

En cuanto a seguridad debe de proveerse capacitación al personal para el uso de ácidos y condiciones peligrosas. Los equipos que se emplean se consideran peligrosos y no cualquier operario puede emplearlos, debe tener conocimiento de cómo controlar una torre de destilación y qué hacer en casos de inundación u otros problemas que se puedan dar, más que las sustancias que se emplean como lo es el aceite negro son sustancias que se consideran altamente tóxicas (García, 2011).

4.2.4. Extracción con un solvente.

Este método nace con la intención de cubrir las desventajas ambientales de los métodos por destilación al vacío y reacción química. El producto que se obtiene en este caso es un aceite base, en condiciones óptimas para ser recargado con aditivos y vender como lubricante nuevo.

El proceso inicia tal como se observa en la figura 4.7 con una deshidratación del aceite, en esa etapa se elimina el agua presente en el aceite. Luego se calienta la base del aceite a unos 300 °C y se brinda agitación, en ese punto se eliminan algunas sustancias livianas, una vez finalizada esa etapa se mezcla con el solvente, el cual puede estar a presión atmosférica y 25 °C, esto se lleva a cabo en un cono mezclador a contra corriente por al menos una hora, posteriormente con centrifugación se eliminan las partículas pesadas, y el solvente se recupera con una destilación en su punto de ebullición. Por último, el aceite procede a tratarse con hidrogeno para desencerar la mezcla y así dejarlo listo para utilizarlo como base de otros lubricantes (Emam & Shoaib, 2013).

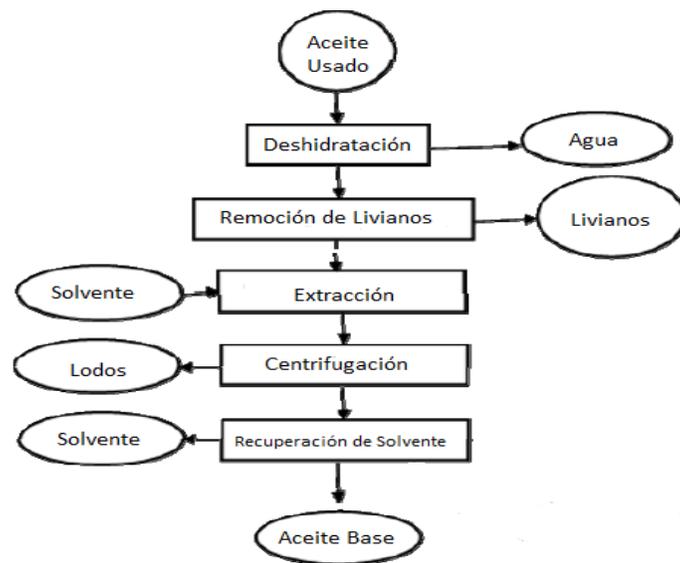


Figura 4.7. Diagrama del proceso de extracción con solvente (Emam & Shoaib, 2013).

Algunos solventes comunes para este tipo de estudios son el alcohol tetrahidrofurfuril, el alcohol butílico, alcohol isopropílico y la metil etil cetona conocido como MEK. El más recomendable a emplear es el MEK, debido a que su punto de ebullición es bajo de 80°C lo cual facilita su

recuperación y en términos económicos es más factible. Sin embargo, en caso de emplearse esta metodología sería apto comparar solventes mediante pruebas de laboratorio con la materia prima, ya que esta es muy variable y así analizar cual brinda los mejores resultados (Emam & Shoaib, 2013).

La principal ventaja del método es que no presenta desechos, ya que los fondos pueden utilizarse en la manufactura de pavimentos. Sin embargo, esos fondos requerirían de un análisis y contienen metales y otras sustancias peligrosas, por ende habría que tratarlos con un almacenamiento especial y mucho cuidado. Entre sus desventajas está la recuperación del solvente mediante una destilación, ya que esta es una materia prima costosa que no se puede desechar si se desea un proceso rentable (Emam & Shoaib, 2013).

La calidad del producto obtenido posterior al hidrotratamiento es muy alta, ya que se obtiene una base de aceite apta para volver a ser cargada con aditivos y poder emplear a nivel industrial (Emam & Shoaib, 2013).

Se dice que el máximo de agua que debe tener el aceite antes del proceso es de un 2%, esto no quiere decir que si presenta un 10 % de humedad no se pueda llevar a cabo, el hecho es qué en el diseño como tal del equipo y su funcionamiento, se requerirá mucho solvente y un tiempo de operación mayor a una hora (Emam & Shoaib, 2013).

La inversión que debe realizarse es una desventaja ya que requiere de equipos muy costosos y servicios auxiliares como generación de vapor, enfriamiento y aumento de presión. Además, las condiciones de operación, presión y temperatura son elevadas, por lo tanto, su costo de operación también se eleva. Por otra parte, se requiere de un solvente para poder extraer las impurezas de la fracción y debe montarse además algún sistema posterior para poder recuperarlo, ya que suele ser una sustancia muy costosa y valiosa. También presenta la desventaja que la operación es complicada debido al tipo de operaciones unitarias llevadas a cabo, por lo tanto, el personal debe estar capacitado para su correcto uso.

En cuanto a la seguridad del proceso, el solvente y la materia prima son sustancias tóxicas, su manejo debe hacerse con medidas preventivas de seguridad. En caso de fallos las presiones y temperaturas del proceso son altas, por ello hay riesgos de explosión, entonces deben manejarse muy bien controladas las operaciones. Por último el mantenimiento de una columna de fondo

cónico para extracción suele ser costoso, requiere de personal capacitado y especializado para llevarlo a cabo ya que es una tecnología muy especializada y debido a las condiciones de operación que se manejan en el proceso, el mantenimiento correcto se torna sumamente importante para prevenir futuras fallas (Emam & Shoaib, 2013).

4.3. Refinamiento del producto.

Para la tercera etapa en donde se deja el producto en condiciones aptas para su uso, se tienen dos alternativas un hidrotratamiento o bien el uso de arcillas. A continuación, se presentan las descripciones de ambos procesos, sus ventajas y desventajas para facilitar la escogencia de la tecnología que mejor se ajuste al proceso mediante la herramienta de selección.

4.3.1. Hidrotratamiento.

El hidrotratamiento es una etapa posterior a los procesos de tratamiento a los aceites usados donde se lleva a cabo la obtención de un aceite base. En el proceso como tal se logra llevar a cabo el desencerado del aceite con ayuda de la adición de hidrógeno y deja el producto apto para ser recargado nuevamente con aditivos y así tener un lubricante en condiciones aptas para uso en motores (Emam & Shoaib, 2013).

El proceso se resume de la siguiente manera, se hace pasar el aceite obtenido a un reactor de lecho empacado, con el fin de poder llevar a cabo la reacción catalizada, el empaque puede ser níquel o bien molibdeno. Las condiciones de operación son una temperatura 350 °C y una presión de 4 900 kPa. El hidrógeno se alimenta por varias zonas y se mantiene la reacción durante cuatro horas (Emam & Shoaib, 2013).

En cuanto a los costos de equipo, por tratarse de un reactor de lecho empacado y requerir de sistemas que alcancen temperaturas alrededor de 350 °C y presiones del orden de 4 900 kPa, son

altos. Además que los materiales para soportar estas condiciones son de alto valor debido a que deben de resistir dichas cargas térmicas, tensiones y compresiones.

Los costos de operación de este sistema son elevados, ya que la reacción dura cuatro horas, requiere de condiciones elevadas de presión y de temperatura, por lo tanto las corrientes y equipos de servicio representan un costo importante a considerar, donde el factor a dimensionar está asociado con el espesor de los equipos.

La seguridad de los equipos es de cuidado, ya que el hidrógeno es una sustancia altamente explosiva. Además, las condiciones de temperatura y presión son un factor que debe considerarse. El mantenimiento de estos equipos lo debe realizar un ente especializado preferiblemente, debido a las altas presiones que se manejan y en caso de no hacerse correctamente puede ocasionar un fallo.

Un proceso donde la operación unitaria es un hidrotratamiento no puede ser ni llevado a cabo, ni supervisado por personal no competente. Ambos deben ser capacitados para manejar el hidrógeno y las operaciones de extracción seleccionadas.

4.3.2. Filtración con arcillas.

Las arcillas son una herramienta muy utilizada desde hace tiempo, consiste en hacer pasar el aceite por estas y dejar que ellas actúen limpiando el hidrocarburo debido a la actividad de sus poros, decoloran el producto, lo cual desde un punto de vista de calidad es bueno ya que estos aceites suelen ser negros. Sustituyen por completo al carbón activado debido a que este último atrae mucho los aceites, además es mucho más rentable ya que el carbón es más costoso. Esta operación se usa en muchas áreas de las industrias. En este caso se puede acoplar este sistema a procesos donde la calidad obtenida del producto es menor, por ejemplo la obtención de aceites combustibles.

La operación se resume de la siguiente manera, el aceite proveniente del proceso se hace pasar por un sistema de filtrado con arcillas, en ese punto se va a mejorar el color del aceite, y se van a

eliminar trazas de acidez. En este proceso se pierde en desecho entre un 2 y 3 % M/M de aceite y arcillas contaminadas, el aceite limpio se almacena para su uso como combustible.

Una ventaja que presenta este tratamiento es que es fácil de operar, ya que se resume a un bombeo del aceite a través del sistema con arcillas. Otra ventaja son los costos de operación, ya que se consideran bajos, debido a que se lleva a cabo temperatura y presión ambiente, por lo tanto no resulta un costo extra. La inversión es pequeña, lo cual representa otra ventaja (Emam & Shoaib, 2013).

El equipo mayormente empleado suele ser una columna empacada con la arcilla. Donde se alimenta por arriba el aceite sucio y se recoge por abajo una vez tratado, puede implementarse un sistema de filtración posterior. Sin embargo, puede resultar no útil debido al tamaño de partículas, sin embargo, algunas industrias lo emplean por seguridad (Bailey, 1984).

En cuanto a la seguridad del proceso, el riesgo es bajo, salvo que se está tratando con sustancias tóxicas como lo es el aceite usado. El personal debe de estar capacitado para manipular sustancias ácidas, básicas y reactivas. Por otro lado, el mantenimiento debe de hacerse periódico de acuerdo a las especificaciones que se tengan para la arcilla, ya que esta se agota cada cierto tiempo.

Una alternativa al sistema de filtración con arcillas es únicamente neutralizar el excedente de ácido procedente de la reacción y recurrir a un sistema de separación previo más eficiente como lo es una centrifugación y un sistema de filtrado, como el tipo prensa para retirar en caso de la utilización de cal para la operación deseada.

5. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

En la presente investigación se analizaron dos parámetros, el contenido de agua y sedimento y la cantidad de metales pesados en el aceite usado. Se consideraron estos dos contaminantes, debido a que son los parámetros que originan mayores inconvenientes en los productos a obtener. El agua y sedimento disminuyen el poder calorífico para el caso de un combustible; mientras que para el caso de un aceite base puede generar insolubilidades o grumos que se traducen en problemas durante la lubricación en un motor. Por otro lado, los metales representan una problemática tanto a nivel ambiental como operativo, técnicamente si se obtiene un combustible, estos no se logran quemar y pueden generar incrustaciones en las tuberías de los equipos. Mientras que como lubricante generaría una fricción mayor entre las piezas del motor, lo cual puede ocasionar el deterioro de una o varias piezas en la máquina.

Esta materia prima presenta la desventaja de ser muy variable entre un barco y otro, por ende, la caracterización de las muestras toma relevancia a la hora de considerar hacer un diseño. En la sección 5.1 se explica la estrategia de muestreo que se llevó a cabo con el fin de mitigar la alta variabilidad del aceite usado en los barcos.

Para llevar a cabo dicho proyecto se contó con la colaboración de la empresa “Acarreos y Servicios S.A.” (ACASE S.A.). Esta empresa se dedica a la limpieza de los tanques donde se acumulan los aceites residuales de los barcos que arriban en el muelle de Moín, posterior a ello le dan un servicio de trasiego a dicha materia hasta una cementera, que aprovecha la energía disponible en el aceite mediante su combustión en los hornos de clinker.

5.1. Muestreo del Aceite Residual.

Los tanques se muestrearon de la siguiente manera: se hacía la limpieza del barco a una cisterna de la empresa ACASE S.A. mediante un sistema de bombeo. Se desplaza la materia al predio,

ubicado a seis kilómetros del muelle. Luego se toman muestras pequeñas en distintas alturas de la cisterna, debido a que puede haber cambios notables de densidad por el contenido de agua y lodo en el desecho y además de que esta no es homogénea. En la figura 5.1 se muestran las alturas que se escogieron para muestrear la cisterna, donde se pretende que la muestra a analizar sea representativa de todo el tanque.

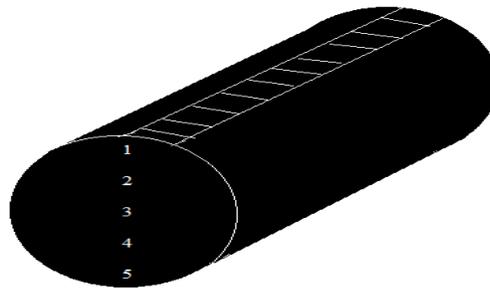


Figura 5.1. Diagrama de las alturas de muestreo en una cisterna (Madrugal, 2015).

Las alturas numeradas en la figura 5.1 se refiere a la posición donde el muestreador toma su alícuota. Las cisternas de ACASE S.A. tienen una profundidad y diámetro de 1,80 m mientras que un largo de 13 m. Estas viajan por seguridad a un 80 % de su capacidad. Por ende la altura uno se refiere a una profundidad en la cisterna de 1,40 m. Se refiere a profundidad a la altura que hay del fondo de la cisterna hasta el punto donde está colocado el muestreador. Para el caso de la altura dos la profundidad fue de 1,05 m. En cuanto a la altura tres, la inmersión se da a 0,70 m. La altura dos está a 0,35 m del fondo. Y la altura cinco completamente al fondo de la cisterna.

Para realizar esta tarea se contó con sistema muestreador de la empresa ACASE S.A, el cuál es un tubo PVC para alta temperatura de cinco centímetros de diámetro, el cual dispone de una válvula de globo en la parte superior del mismo, donde una vez que se abre la llave, el tubo se llena debido a un desplazamiento por diferencia de presión entre el fluido donde está inmerso y la gravedad o aire a las afueras del tubo. Una vez lleno, se cierra la válvula superior y esto permite que no se derrame la muestra. Para las partes altas del tanque se utilizaba un dispositivo que generaba vacío de modo que se facilitaba la labor de llenado del muestreador. Cabe destacar que de esta manera se logra que cada muestra que se toma con dicho sistema tenga el mismo tamaño, el volumen tomado fue de $0,000\ 25\ m^3$ por muestra. Se procede a colocar cada una de las cinco

muestras de las distintas alturas en un recipiente y se mezclaban, lo anterior se realizaba para cada cisterna de barcos distintos.

Con el fin de mitigar el efecto de la alta variabilidad entre barcos, se tomaron muestras en un recipiente debidamente rotulado para 30 barcos distintos, durante 30 días diferentes. Posteriormente todas las muestras se unieron en un único estañón, se agitaba el mismo hasta lograr homogenización y del mismo se tomaban las muestras que se analizaron en la presente investigación.

5.2. Contenido de agua y sedimento.

Para estimar el contenido de agua y sedimento en el aceite residual se siguió la norma ASTM-D1796-11. Esta se basa en el uso de la fuerza centrífuga para cuantificar dicho contenido, la norma aplica para el ámbito de 0 a 30 % v/v. Se calienta la muestra a $(60 \pm 1) ^\circ\text{C}$, se colocan dos tubos de fondo cónico graduados de 100 mL, con 50 mL del aceite usado y con 50 mL tolueno en agua (solvente saturado).

Algunas veces puede usarse un desémulsificante para favorecer la separación del agua del aceite. Se colocan por diez minutos en la centrifuga ambos tubos en dirección opuesta en un ámbito de 500 a 800 rcf (fuerza centrífuga relativa), la prueba se hace por duplicado (ASTM, 2013).

En la sección de anexos se muestra un resumen de la norma con los procedimientos y requisitos para cuantificar el agua y sedimento. Del estañón donde se colocaron todas las muestras de cada barco, se tomaron 7 alícuotas representativas del mismo, para ello se procedió a realizar una agitación vigorosa antes de tomar cada una.

Con el fin de analizar los resultados y brindar un contenido de Lodo y sedimento (BSW) promedio, se graficaron los datos del cuadro A.2. Dicha información se representa en la figura 5.1 donde se observa como varían las muestras en cuanto al contenido de lodo y agua, lo cual hace referencia a la alta variabilidad de este producto. A partir de dicha figura se determinan los límites superiores e inferiores de lodo y sedimento en el aceite. De esta manera se puede brindar un valor de trabajo

que maneje un factor de seguridad apropiado a la hora de diseñar un proceso, con el límite superior para mantener seguridad de que el diseño vaya a funcionar apropiadamente durante la limpieza del aceite usado.

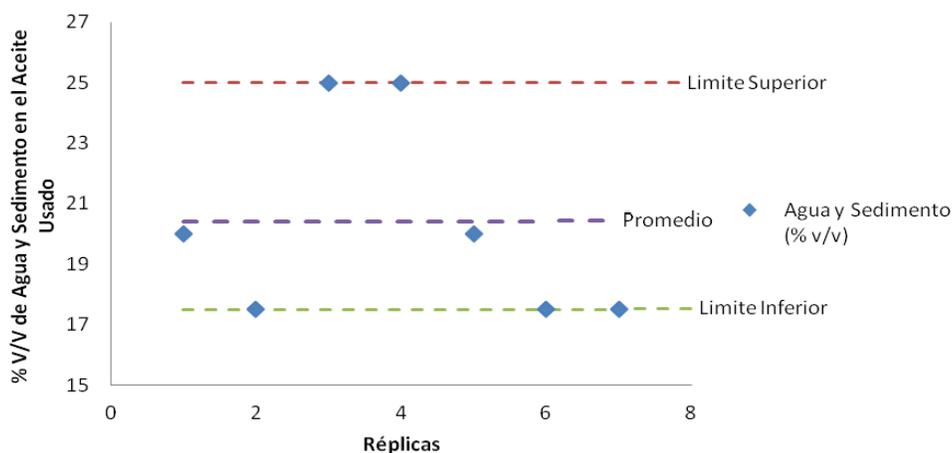


Figura 5.2. Variación del BSW en las réplicas analizadas de aceite usado de barco (Madrigal, 2015).

De acuerdo con la figura 5.2 la caracterización del BSW en el lubricante residual, se estima en un $(20,4 \pm 4,6) \%v/v$. Dicho dato lo que quiere decir es que, por cada litro de aceite residual, al menos el 20,4 % respecto al volumen total es agua y sedimento, con una incertidumbre o variación del 4,6 %. El proceso para un contenido de agua y sedimento de 25,0 % v/v, ya que el límite superior calculado resulta ser dicho valor. Por otra parte, el este parámetro en los combustibles no puede ser superior a 0,05 % v/v, por ende la importancia de medirlo al inicio y al final del proceso para poder dar seguimiento de cómo se comporta y realizar ajustes operativos de ser necesario con el fin de alcanzar el límite permitido.

5.3. Contenido de metales pesados.

Para la estimación de este parámetro se tomaron como referencia, valores máximos reportados en referencias teóricas, de análisis realizados a aceites de barcos, que aplican para la presente investigación, debido a que se trata del mismo tipo de aceite, SAE 40, y se compararon contra los

valores mínimos reportados por las normas ASTM, para aditivar un aceite base y libros sobre análisis de motores a partir del aceite residual.

En un aceite usado se tienen partículas metálicas por tres motivos, uno por desgaste del motor, dos por degradación de los aditivos del aceite y tres por contaminación externa (Pérez, 2011). En el caso de las partículas metálicas por desgaste del motor se puede obtener información valiosa acerca del nivel de deterioro de las piezas del motor, ya que un desgaste excesivo no es normal. Para el segundo caso de partículas metálicas provenientes de los aditivos, se sabe que estos últimos son órgano-metálicos, entonces al degradarse se acumulan metales en el mismo. Por último, las partículas metálicas por contaminación externa, provenientes de la arena, barros, polvo, entre otros. La tierra y otros contaminantes de esta índole al estar en el aceite actúan como una especie de lija, ocasionando que se formen partículas por desgaste del motor.

En el cuadro 5.1 se muestran las partículas ordenadas en estos tres niveles y los límites permisibles, valores superiores a estos, es un indicativo de que debe de hacerse una revisión en alguna zona específica del motor por un desgaste excesivo, o bien que se está dando una contaminación por parte del medio sobre el aceite o incluso que el aceite se encuentre muy degradado por su uso.

Cuadro 5.1. Partículas metálicas por desgaste del motor, degradación del aceite SAE 40 y por contaminación en los lubricantes (Saldivia, 2013),(ASTM,2010).

Metal	Contenido permitido máximo (ppm)
Por Desgaste del Motor:	
Hierro	100
Cromo	15
Plomo	40
Cobre	45
Estaño	20
Aluminio	20
Níquel	5
Plata	5
Vanadio	5
Molibdeno	5
Por Contaminación:	
Sílice	15
Sodio	30
Cadmio	10

Continuación Cuadro 5.1. Partículas metálicas por desgaste del motor, degradación del aceite y por contaminación en los lubricantes (Saldivia, 2013),(ASTM,2010).

Metal	Contenido permitido máximo (ppm)
Por Aditivos del Lubricante (Mínimo Permissible):	
Boro	500
Magnesio	500
Calcio	1 750
Bario	500
Fósforo	1 000
Zinc	1 400
Potasio	500
Manganeso	500

Como se aprecia en el cuadro 5.1 los metales por aditivos más bien presentan valores mínimos permisibles, esto se debe a que dichas partículas brindan propiedades de interés al lubricante, por ejemplo el calcio y el magnesio son agentes dispersantes, que combaten el hollín y neutralizan los ácidos que se forman en el aceite. El zinc y el fósforo brindan protección anti-desgaste, generan capas que hacen que la fricción metal-metal sea pequeña. Si se suman todos los metales pesados que pueden venir en el aceite residual se obtendría un valor de 6 965 ppm. Con la clara afirmación de que dicho resultado puede ser superior debido a que algunos lubricantes pueden traer aún un contenido mayor en aditivos.

En el cuadro 5.2 se muestran los análisis promedio, de metales pesados de un estudio realizado por la Escuela de Organización Industrial de Sevilla. Se tomó como referencia dicha Universidad ya que España actualmente es un pilar en el aprovechamiento térmico de los aceites residuales de barco, donde las compañías fabricantes de aceites tienen la obligación de recolectar el aceite posterior a su uso y tratarlo, ya sea para reaprovechar su base o bien obtener energía (Saldivia, 2013).

El objetivo de mostrar dicho cuadro está en observar que el resultado de una caracterización debe ser inferior al reportado en la sumatoria del cuadro 5.1 que establece las condiciones máximas que se pueden llegar a tener por contaminación y por desgaste del motor; y las condiciones mínimas por degradación de los aditivos. Se puede concluir de ello si el contenido en un lubricante usado es inferior a 6 965 ppm, que éste aún no se encuentra totalmente degradado, por ende los órgano-metálicos aún no forman parte de las partículas sólidas totales (P.T.S.) y no van a ser separados

con una centrifugación, filtración ó proceso físico similar. Por ende se recalca la importancia de llevar a cabo un tratamiento a los órgano-metálicos, para poderlos separar del aceite, ya que los mismos son un inconveniente tanto ambiental como operativo a la hora de emplear el aceite como un combustible alternativo al Bunker C.

Cuadro 5.2. Contenido de metales pesados en aceites usados de España (Moya & Botamino, 2010).

Componente	Cantidad (ppm)
Plomo	7,535
Calcio	4,468
Zinc	1,097
Fósforo	931,0
Magnesio	309,0
Bario	297,0
Hierro	205,0
Sodio	118,0
Potasio	31,0
Cobre	29,0

En total se tienen 1 933,1 ppm de metales pesados en el aceite de barco tomado por la Universidad de Sevilla, dicha cifra es inferior a 6 965 ppm, por ende, se concluye que hay que tratar el aceite para luego poder separar estos contaminantes y así poder dejar el producto en condiciones aptas para usarse como Búnker C.

En cada uno de los tratamientos a los órgano-metálicos descritos en la sección 4.2 de la presente investigación, se mostraron las condiciones con las cuales se logran atacar estas partículas satisfactoriamente. De igual forma en el diseño que se lleve a cabo, se considerarán las peores condiciones de un aceite, para esto como el contenido de aditivos en un lubricante de barco es el mínimo respecto a lubricantes más especializados como un automóvil, se concluye de estas referencias que el contenido de metales es de 6 965 ppm como máximo. Incluso si se obtuviese como resultado una cifra mayor a esta durante un análisis, puede concluirse que se da contaminación externa en alguna parte del motor o que el mismo se está dañando y debería de revisarse el motor, ya que por aditivos esa formulación es la base de todo lubricante, condiciones superiores dependerán de la casa fabricante, el mercado que tratan y el motor en el cual va a ser empleado. Recordando una vez más que los lubricantes de barco son los que traen menos aditivos por su uso y esta formulación es económicamente la estándar.

6. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE PRODUCCIÓN

Para llevar a cabo el diseño de un proceso, se debe tener claro el volumen de producción que se desea tratar. Este es un dato es muy importante ya que puede depender de otros factores, como la cantidad de clientes potenciales que se puedan tener a futuro, el mercado, la competitividad con otros, factores indirectos como disponibilidad de materia prima, gastos, costos de operación, entre muchos otros factores. Además, con base a este dato es que se dimensionan los equipos.

Para definir un volumen de producción, se coordinó con el Señor Alberto Gutiérrez Gamboa, director de la empresa ACASE S.A. con el fin de tomar como volumen de producción, la cantidad de producto ellos recuperan mes a mes.

Según ACASE S.A. existen clientes potenciales para la compra de todo el producto que se pueda generar, debido a que el precio de éste es mucho inferior al Búnker C. En el cuadro 6.1. se muestra un resumen del registro histórico de la cantidad de aceite residual que recolecta la empresa mensualmente desde Junio del 2014 hasta Marzo del 2015.

Cuadro 6.1. Registro histórico de la empresa ACASE S.A. acerca la cantidad de aceite residual que se obtiene mensualmente por parte de ellos (ACASE S.A., 2015).

Mes	Cantidad de Aceite Residual Recolectado (L)
Junio 2014	500 000
Julio 2014	525 000
Agosto 2014	475 000
Setiembre 2014	475 000
Octubre 2014	500 000
Noviembre 2014	525 000
Diciembre 2014	275 000
Enero 2015	350 000
Febrero 2015	550 000
Marzo 2015	525 000
Total	4 700 000
Promedio (por mes)	470 000

Como se aprecia en el cuadro 6.1 la cantidad de materia recolectada puede variar de un mes a otro. Lo anterior se debe a que en algunas ocasiones los barcos requieren mayor o menor servicio.

El volumen promedio por mes de 470 000 litros de aceite residual, con base en este dato se decidió definir el volumen de producción de combustible a partir de la materia prima que se puede procesar.

A la hora de definir el volumen es recomendable utilizar un factor extra de seguridad. Por ejemplo para el mes de febrero del 2015 se obtuvieron 550 000 litros, entonces si se limita el proceso a 470 000 litros no podría tratarse dicho desecho. Por lo tanto, se definió en 600 000 litros mensuales de aceite residual. Con base en este volumen es que se dimensionó y diseñó el proceso.

7. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA EL PROCESO

En el capítulo 4 se describieron las tecnologías con las cuales se podría diseñar un proceso a partir de un aceite usado. Para la escogencia de la tecnología del proceso, se utilizó una matriz de selección. En ella se le da una calificación a cada tecnología de acuerdo a sus ventajas y desventajas en una serie de parámetros que son de interés. La nota sería de cero (0) a tres (3), donde cero (0) sería pésima, uno (1) significaría mala, dos (2) representaría buena y tres (3) correspondería a excelente. Esa calificación se multiplica por el porcentaje de importancia de cada parámetro. Finalmente se suman y la que obtiene resultados mayores sería la tecnología más apropiada para el proceso en cuestión.

7.1. Parámetros seleccionados para comparar con la herramienta de selección.

Se seleccionaron los siguientes parámetros para comparar las tecnologías:

1. Impacto ambiental.
2. Facilidad de operación.
3. Mantenimiento.
4. Costos de equipo.
5. Costos de operación.
6. Seguridad de operación.
7. Desechos.
8. Subproductos.
9. Calidad del producto obtenido.

A continuación, se hará breve referencia a cada parámetro, su definición, el por qué es relevante en el proceso de tratamiento al aceite residual de barco y el significado de la nota que va a

obtener dicho parámetro en cada tecnología a la hora de implementar la herramienta de selección.

7.1.1. Impacto ambiental.

El impacto ambiental es un tema que hoy en día toma mucha relevancia debido a la necesidad en varios temas como minimizar las emisiones, la contaminación del suelo, la protección del agua, entre otras. A la hora de seleccionar una tecnología es necesario considerar este factor, ya que si se desea llevar una operación y no se considera este aspecto, puede haber una oposición por parte de los entes ambientalistas. Por otra desde el punto de vista de responsabilidad ambiental deben evaluarse todas las alternativas posibles para minimizar el efecto sobre el medio. En caso de incurrirse en un impacto sobre el medio, deben analizarse las posibles medidas de mitigación a implementar. Finalmente dentro de los aspectos relevantes de este factor, está la parte legal, analizar si existen formulaciones, emisiones permitidas, control de efluentes, entre otras, para el proceso en específico que se va a llevar a cabo.

Las empresas suelen hacer evaluaciones o estudios de impacto ambiental que respalden el funcionamiento de las industrias, en caso de accidentes, derrames, fugas de gases, entre tantas posibles fallas, también resulta necesario analizar el impacto que este pueda tener en el ambiente (Gómez & Gómez, 2013).

Con base en lo anterior y para el uso de la herramienta de selección del presente proyecto, la nota cero (0) se refiere a que la tecnología desde un punto de vista de impacto ambiental es muy grave, peligrosa para la flora y fauna, genera muchos problemas ambientales o bien sus emisiones son desproporcionadas. Si obtiene un valor de (1) quiere decir que causa un daño al ambiente grave pero puede mitigarse mediante algunas medidas correctivas o preventivas, las cuales se reflejarán en los costos de trabajo. En caso de obtener una calificación de (2), es porque la tecnología es buena en el aspecto ambiental, o sea que casi no genera daños al medio y en caso de generarlos pueden ser mitigados satisfactoriamente, sin representar un costo elevado. La última calificación que se le puede asignar a una tecnología en específico sería de (3), la cual quiere decir que es

excelente en este ámbito. Esa calificación se otorga si la planta no genera ningún inconveniente ambiental.

7.1.2. Facilidad de operación.

La facilidad de operación de los equipos es un parámetro que toma relevancia a la hora de seleccionar un equipo, ya que si se cuenta con sistemas que requieren elevado conocimiento se va a incurrir en mano de obra especializada, lo cual se ve reflejado en una planilla mensual más costosa. Otras veces se vuelve necesario incurrir en capacitaciones o estudios extras aportados por la empresa con los trabajadores. Por ende a la hora de seleccionar una tecnología para el diseño de un proceso, hay que pensar en tener herramientas competitivas y que faciliten su operación lo máximo posible, dentro de los márgenes lógicos para llevar a cabo una operación en específico (Ramírez & Cajigas, 2004).

La distribución de notas para la facilidad de operación estuvo de dada de la siguiente manera, si se le asigna una nota de (0) quiere decir que ese equipo es sumamente difícil de operar, nadie puede operarlo salvo el fabricante o un especialista, por ende es necesario incurrir en un gasto laboral alto. En el caso de asignársele una nota de (1), se refiere a que el proceso es difícil de operar pero puede darse una correcta capacitación a los trabajadores para llevarla a cabo. Si se recibe una nota de (2) es porque la tecnología no es difícil de operar, por ejemplo una bomba, sistemas automáticos, donde con conocimientos básicos en ingeniería y del proceso puede llevarse a cabo. Por último si más bien se le otorga una nota de (3) es porque cualquiera puede operar la planta ya que es sumamente fácil de realizar.

7.1.3. Mantenimiento.

Al igual que el punto anterior sobre facilidad de operación, otro aspecto de importancia para llevar a cabo una buena escogencia es analizar el tipo de mantenimiento que requieren los equipos del

proceso. Algunas veces puede resultar necesario un mantenimiento preventivo, en otras ocasiones un mantenimiento más temprano, en unos casos es costoso, debido a los procesos de limpieza, soldadura, cambio de filtros, entre otras.

En ciertos procesos el mantenimiento es muy especializado, esto lo que quiere decir es que debe ser realizado por algún profesional específico, capacitado para ello debido a la complejidad del caso. Dependiendo del tipo de mantenimiento que se le haga a una planta, así se verán afectados los costos por operar mes a mes (Ramírez & Cajigas, 2004).

Por lo tanto se considera un parámetro de importancia para la selección de los equipos dentro de la presente investigación, ya que si se desea un proceso que sea rentable es de suma importancia considerar este factor dentro de los aspectos económicos a cubrir durante la evaluación del proyecto.

La asignación de calificaciones para el caso de mantenimiento se hizo de la siguiente manera. Si recibe una nota de (0) es porque el mantenimiento es sumamente malo en aspectos rentables, ya sea porque es altamente especializado y representa un costo muy alto o porque del todo no se puede hacer y requiere estar cambiando de equipos. En caso de obtener calificación (1) es porque se considera malo, ya sea porque aunque sea especializado, difícil de realizar o costoso económicamente, sin embargo aun así el personal de la planta podría ser capacitado para llevarlo a cabo. Para el caso de una nota de (2) o buena, es porque en si el proceso como tal debe recibir un mantenimiento constante y fácil de realizar. Para que la nota obtenida sea (3), excelente, el mantenimiento debe ser mínimo, fácil de realizar y sumamente económico.

7.1.4. Costos de equipo.

El costo de los equipos es un parámetro sumamente importante ya que representa un porcentaje muy alto en la inversión que debe hacerse para llevar a cabo la implementación de una planta, por lo tanto se consideró relevante este parámetro para llevar a cabo la selección de la tecnología que mejor se ajuste a las necesidades (Peters & Timmerhaus, 1991).

Para asignar notas a los costos de equipo en una tecnología resulta muy complicado dar un rango de puntuación. Ya que para algunas industrias algo puede ser muy barato mientras que para otras no lo es así. Sin embargo, una manera de hacerlo sería planteárselo de manera que entre más económico sea el proceso para el que invierte, mejor nota obtiene.

Por lo tanto, para el presente proyecto recibe una nota de (0) aquella tecnología que representa un costo muy elevado, debido a los materiales, geometría, diseño, entre otras variables con que se encuentra hecho el sistema y afecta directamente la rentabilidad del proyecto, de modo que puede decirse que el mismo es insostenible al comprar dicho equipo. Si obtiene una nota mala o de (1), es porque económicamente no es imposible de llevar a cabo, pero sus costos son muy elevados, requiere de muchos sistemas de servicio, elevar temperatura, presión, suministro de vapor, es difícil de construir, entre otras. Si se califica con (2) es porque sus costos no son tan elevados, sin embargo, la rentabilidad de la inversión no permite dar un sí definitivo para llevar a cabo una inversión. Mientras para que se pueda considerar excelente o de nota (3), es porque el equipo puede construirse fácilmente y sus costos son bajos, de modo que la rentabilidad del proyecto es positiva.

7.1.5. Costos de operación.

Otro factor que afecta la rentabilidad económica de un proyecto son los costos de operación, en este factor se incluye la mano de obra, las materias primas, los reactivos, el trasiego, el consumo eléctrico, los permisos municipales, el requerimiento de vapor, los combustibles, la elevación o disminución de presión, entre otros, que usualmente se calculan para saber con cuánto dinero se debe de contar, para operar la planta mes a mes y no tener un déficit en ese aspecto. Por lo tanto, es un parámetro, que se decidió considerar, a la hora de llevar a cabo la selección de las tecnologías en esta investigación, ya que si resulta un proyecto que en diseño cumple con las especificaciones técnicas al pie de la letra, pero no es rentable mes a mes debido a lo que le cuesta operar, no tendría sentido desarrollar dicho proyecto (Peters & Timmerhaus, 1991).

Las asignaciones para este parámetro se consideraron de la siguiente manera. Una nota de (0) para aquellas tecnologías en las que los costos de operación hacen que un proyecto no tenga viabilidad económica. Se le asigna un (1) a los costos de operación cuando la rentabilidad parece dar resultados mínimos. Una calificación de (2) para las tecnologías que representen una viabilidad económica mínima, donde se juega con las condiciones límite para poder salir adelante en el transcurso mensual. Por otro lado, recibe una nota de (3), la tecnología que en cuanto a costos de operación no va a afectar la rentabilidad del proyecto.

7.1.6. Seguridad de operación.

La seguridad de operación en las industrias es un factor que debe de considerarse a la hora de diseñar un proceso, ya sea de acuerdo a los reactivos que se van a emplear, el nivel de ruido al que se exponen los operarios, al riesgo de golpes, daños a la salud, entre otros factores que pueden afectar a un trabajador. Todos los factores deben analizarse y con ello disponer de medidas de mitigación, equipos de seguridad apropiados: lentes, guantes, gabachas, zapatos de seguridad, entre otra serie de aspectos para mitigar el aspecto de seguridad (Storch & García, 2008).

Este factor afecta directamente la rentabilidad económica de un proyecto, ya que hay casos que hay que llevar a cabo una inversión mayor en seguridad para poder implementar una tecnología específica. Este parámetro se considera relevante a la hora de seleccionar equipos y tecnologías en la presente investigación, tanto por el aspecto económico involucrado de manera indirecta como por el hecho de garantizar la seguridad de los trabajadores en la misma (Storch & García, 2008).

Las calificaciones en cuanto a seguridad se hicieron de la siguiente forma, se asignó una nota de (0) a cualquier equipo que desde un punto de vista de seguridad no puede llevarse a cabo. La calificación de (1) para aquellos procesos que si pueden ser llevados a cabo, pero las medidas de mitigación y preventivas representan un costo elevado para la empresa. El valor de (2) para los casos en que pueden ser llevados a cabo y los costos son normales, o bien el proyecto los puede cumplir. Por último, una de (3) para los casos óptimos donde en seguridad los costos son prácticamente mínimos y la seguridad de los trabajadores es máxima.

7.1.7. Desechos.

Los desechos que se puedan generar en un proceso, fue otro factor que se consideró dentro de la selección de tecnología en este proyecto, ya que puede ser un impedimento contar con un desecho el cual es muy difícil de tratar, y a largo plazo eleva los costos de operar o inclusive aumenta la inversión que debe de realizarse. Por lo tanto es importante analizar si se van a tener desechos y en dado caso que se puede hacer con ellos (Ramírez & Cajigas, 2004).

Si la tecnología se califica con nota de (0) es porque se genera algún desecho muy tóxico, peligroso o intratable. Para el caso de un valor de (1) se tiene que el desecho puede tratarse y en sí, la viabilidad del proyecto se ve afectada por su tratamiento. Para el caso de (2) quiere decir que el desecho que se genera puede tratarse con un sistema posterior, económicamente manejable. Por último, el valor de (3) para las plantas que no generan desechos durante su operación.

7.1.8. Subproductos.

El factor de subproductos se considera debido a que algunas veces para poder darle una rentabilidad económica a un proyecto se deben de aprovechar los subproductos, si es que los hay, y si no resulta una inversión más costosa para aprovecharlos. Lo que se pretende analizar en este factor es si alguna tecnología presenta algún subproducto realmente aprovechable, respecto a otras (Ramírez & Cajigas, 2004).

Por lo tanto, para el uso de la herramienta de selección se le asignó un valor de (0) a las tecnologías que no producen ningún subproducto al cual se le pueda sacar provecho. Una nota de (1) para las tecnologías que generan un sub producto, pero este hay que tratarlo con algún sistema extra el cual es costoso. Una calificación de (2) si genera más bien un subproducto que con un tratamiento rápido, fácil y económico puede venderse o reaprovechar. Por último, una nota de

(3) para las tecnologías que ya por si solas generan un subproducto listo para sacar provecho económico de este.

7.1.9. Calidad del producto obtenido.

Hoy en día la calidad de los productos es sumamente importante, las industrias cuentan con un departamento dedicado a controlar este parámetro, otras se certifican con alguna normativa, por ejemplo la estandarización ISO-9001, dependiendo del ámbito en el que se opera. La calidad de un producto y el poder brindarle al cliente, con pruebas ya sean hechas en la industria, o mejor aún con una certificación, hace ese producto más competitivo en el mercado.

El control de la calidad ha evolucionado a lo largo de la historia al punto que se cuentan con herramientas estadísticas y muchos “*software*” que ayudan a desarrollar este aspecto. Por lo tanto, se consideró importante comparar la calidad de los productos que se obtienen en cada tecnología, ya que a futuro esto podría darle réditos a una empresa (Verdoy, Mahiques, Pellicer, & Prades, 2006).

En este proyecto se quiere evaluar este parámetro ya que la calidad que se obtiene con diferentes tecnologías es crítica a la hora de comercializar un producto. Con el fin de analizar si es apta o no para vender la materia o requiere sistemas extras para poderla vender es que se decide analizar este parámetro.

Si el producto de un proceso presenta una calidad muy baja, la cual hace que ese producto no sea comerciable recibe una nota de (0). Si más bien requiere de sistemas extras de limpieza y purificación costosos para alcanzar una calidad aceptable se le asigna un (1). Por otro lado, si los sistemas de limpieza no son elevados económicamente, se considera brindar una nota de (2). Por último, si la calidad es tal que no requiere sistemas extras, entonces será excelente en este aspecto y se le otorgará un (3).

7.2. Ponderación de los parámetros.

En el cuadro 7.1 se presenta la ponderación obtenido para cada uno de los parámetros escogidos, para ello se dio una calificación por parte del director del proyecto, otras por parte de los lectores y otra por parte del sustentante de acuerdo al criterio y experiencia de cada calificador, por consiguiente se tomaron dichos datos y se promediaron sus resultados. En los anexos se pueden consultar los porcentajes brindados por cada integrante, dicha información se observa en el cuadro D.2.

Cuadro 7.1. Porcentajes de importancia promedio de los parámetros para seleccionar el proceso a llevar a cabo (Madrigal, 2015).

Parámetro	Porcentaje de Importancia Promedio (%)
Impacto ambiental.	14
Facilidad de operación.	9
Mantenimiento.	7
Costos de equipo.	13
Costos de operación.	14
Seguridad de operación.	13
Desechos	11
Subproductos	7
Calidad del producto obtenida	12
Total	100

7.3. Selección de tecnologías.

En los cuadros 7.2, 7.3 y 7.4 se muestran los resultados promedio de las notas brindadas (0, 1, 2 ó 3) a cada tecnología con respecto a los parámetros técnicos y económicos escogidos; tanto para separar el agua, como para tratar los metales y refinar el producto. Del mismo modo se presenta el resultado de multiplicar dicha nota por el porcentaje de importancia correspondiente mostrado en el cuadro 7.1. Es importante resaltar que en la sección de anexos se presentan las calificaciones individuales en el cuadro D.3, a partir de los que se calcularon los valores promedio.

Cuadro 7.2. Notas promedio de las tecnologías para separar agua y sedimento, respecto a cada parámetros técnico y económico (Madrigal, 2015).

Parámetro	Tecnología	Nota Promedio Obtenida	Nota promedio multiplicada por el porcentaje de importancia.
Impacto ambiental.	Sedimentación	1	21,0
	Centrifugación	3	38,5
Facilidad de operación.	Sedimentación	3	20,3
	Centrifugación	2	24,8
Mantenimiento.	Sedimentación	3	15,8
	Centrifugación	1	14,0
Costos de Equipo.	Sedimentación	3	39,0
	Centrifugación	1	22,8
Costos de Operación.	Sedimentación	3	38,5
	Centrifugación	2	31,5
Seguridad de Operación.	Sedimentación	3	29,3
	Centrifugación	3	35,8
Desechos.	Sedimentación	1	16,5
	Centrifugación	3	30,3
Subproductos.	Sedimentación	0	3,5
	Centrifugación	0	7,0
Calidad del producto.	Sedimentación	1	18,0
	Centrifugación	3	33,0

Cuadro 7.3. Notas promedio de las tecnologías para tratar los metales y aditivos, respecto a cada parámetro (Madrigal, 2015).

Parámetro	Tecnología	Nota Promedio Obtenida	Nota promedio multiplicada por el porcentaje de importancia.
Impacto ambiental.	Térmico	1,0	14,0
	Reacción	2,5	35,0
	Destilación	1,8	24,5
	Extracción	1,5	21,0
Facilidad de operación.	Térmico	1,5	13,5
	Reacción	2,5	22,5
	Destilación	1,8	15,8
	Extracción	1,5	13,5

Continuación Cuadro 7.3. Notas promedio de las tecnologías para tratar los metales y aditivos, respecto a cada parámetro (Madrigal, 2015).

Parámetro	Tecnología	Nota Promedio Obtenida	Nota promedio multiplicada por el porcentaje de importancia.
Mantenimiento.	Térmico	1,5	10,5
	Reacción	2,0	14,0
	Destilación	1,8	12,3
	Extracción	1,8	12,3
Costos de equipos.	Térmico	1,3	16,3
	Reacción	2,3	29,3
	Destilación	1,3	16,3
	Extracción	1,3	16,3
Costos de operación.	Térmico	1,3	17,5
	Reacción	2,0	28,0
	Destilación	1,5	21,0
	Extracción	1,3	17,5
Seguridad de operación.	Térmico	0,8	9,8
	Reacción	1,8	22,8
	Destilación	2,0	26,0
	Extracción	2,3	29,3
Desechos.	Térmico	1,3	13,8
	Reacción	1,3	13,8
	Destilación	1,8	19,3
	Extracción	1,8	19,3
Subproductos.	Térmico	1,3	8,8
	Reacción	1,8	12,3
	Destilación	2,0	14,0
	Extracción	1,5	10,5
Calidad del producto.	Térmico	1,3	15,0
	Reacción	2,3	27,0
	Destilación	2,5	30,0
	Extracción	2,3	27,0

Cuadro 7.4. Notas promedio para el refinamiento del producto, respecto a cada parámetro (Madrigal, 2015).

Parámetro	Tecnología	Nota Promedio Obtenida	Nota promedio multiplicada por el porcentaje de importancia.
Impacto ambiental.	Sedimentación	1,3	17,5
	Centrifugación	2,3	31,5
Facilidad de operación.	Sedimentación	1,0	9,0
	Centrifugación	3,0	27,0
Mantenimiento.	Sedimentación	1,3	8,8
	Centrifugación	2,3	15,8
Costos de Equipo.	Sedimentación	1,0	13,0
	Centrifugación	2,8	35,8
Costos de Operación.	Sedimentación	0,8	10,5
	Centrifugación	2,5	35,0
Seguridad de Operación.	Sedimentación	1,3	16,3
	Centrifugación	2,3	29,3
Desechos.	Sedimentación	2,0	22,0
	Centrifugación	1,8	19,3
Subproductos.	Sedimentación	0,8	5,3
	Centrifugación	0,8	5,3
Calidad del producto.	Sedimentación	3,0	36,0
	Centrifugación	2,3	27,0

Por último, en el cuadro 7.5 se muestra un resumen de la sumatoria de los datos multiplicados por los porcentajes de importancia, de modo que se obtiene una nota total para cada tecnología que engloba los parámetros técnicos y económicos escogidos para esta investigación.

Cuadro 7.5. Calificación obtenida para las tecnologías para en cada etapa del proyecto (Madrigal, 2015).

Etapas	Tecnología	Nota Obtenida
Separación de agua y sedimento	Sedimentación	201,8
	Centrifugación	237,5
Tratamiento a metales y aditivos	Térmico	119,0
	Reacción	204,5
	Destilación	179,0
	Extracción	166,5

Continuación Cuadro 7.5. Calificación obtenida para las tecnologías para en cada etapa del proyecto (Madrigal, 2015).

Etapas	Tecnología	Nota Obtenida
Refinamiento del producto	Hidrotratamiento	138,3
	Arcillas o Adición de base.	225,8

A partir de la información obtenida se concluye que para separar el agua y los sedimentos, lo más apropiado es hacer uso de una centrifugación, ya que incluyendo tanto parámetros técnicos como económicos obtuvo una nota de 237,5 por encima de 201,8 de la sedimentación. En el caso del tratamiento a los metales y aditivos, la reacción con ácido obtuvo una calificación de 204,5 por encima de los demás procesos, las cuales fueron 119, 179, y 166,5; por ende, el proceso se diseñará con dicha tecnología. Finalmente, el refinamiento se llevará a cabo con la adición de una base con filtración, ya que obtuvo una ponderación de 225,8 sobre 138,5 del hidrotratamiento.

8. DISEÑO DEL PROCESO Y CONDICIONES DE OPERACIÓN.

Se estima que alrededor de un 70 - 80 % de los aceites usados son hidrocarburos que se encuentran en condiciones de poder reutilizarse como un combustible. Esto se debe a su poder calorífico tan alto, el cual es superior al Búnker C. La parte restante aproximadamente el 20 – 30 % consiste en agua, lodo y aditivos principalmente (PROARCA, 2004).

Cabe destacar que si un desecho de estos, intenta utilizarse con un fin energético, sin su previo tratamiento, solo se agravaría el impacto sobre el ambiente, debido al grado de contaminación que presenta este residuo (PROARCA, 2004).

Posterior a la selección de la tecnología, llevada a cabo con la matriz de selección mostrada en el capítulo 7. Se hicieron unas pruebas de laboratorio en pequeña escala. En éstas se simulaba el tratamiento con reacción química, de modo que el mismo se pueda escalar a la producción deseada en el presente proyecto.

El proceso con reacción química se basa en montar un reactor batch estándar, en el cual se ponga a reaccionar el ácido sulfúrico con el aceite usado. En dicha operación se van a dar una serie de reacciones entre los aditivos del aceite, los cuales son compuestos organometálicos y el ácido sulfúrico, de modo que se rompa esa fuerza y se logren separar los metales pesados. El ácido también tiene como ventaja que va a atacar posibles restos acuosos en el aceite que se encuentran en estado de emulsificación. De este modo por efecto de polaridad, los contaminantes van a quedar adheridos a la fase ácida-acuosa (Polar). A dicha fase se le llama en el presente informe como lodo ácido. En este lodo se encontrarán las sustancias polares y los metales pesados. Por lo tanto, se requiere de un sistema de separación de fases posterior a la reacción, con el objetivo de recuperar la otra parte, en este caso la orgánica (No Polar), ya que este es el producto deseado, mientras que el lodo ácido debe recibir un tratamiento o bien brindársele alguna aplicación. Y a las reacciones entre el aceite usado con el ácido sulfúrico se le conoce como reacción de limpieza, la cual más adelante se profundiza y estima el tiempo de residencia mínimo para un sistema por tandas, además los volúmenes y concentraciones que deben de emplearse.

Cabe destacar que la selección del ácido sulfúrico se basa en tres principios, primero es muy fuerte lo cual es un requisito en la reacción, segundo no facilita la formación de dioxinas y furanos durante la combustión del aceite tratado y tercero en precio y disponibilidad ésta sustancia puede manejarse en Costa Rica. A diferencia de por ejemplo el ácido clorhídrico, que puede favorecer la formación de dioxinas y furanos en el proceso de quemado del combustible, lo cual es un impedimento en el uso de hidrocarburos en calderas regulado por el Ministerio de Salud, tal como se comentó en el capítulo 2 de la presente investigación sobre problemática y la legislación pertinente.

En la figura 8.1 se muestran las fases producidas en el medio de reacción posterior al tratamiento con ácido. La fase liviana que se encuentra en la zona superior es la orgánica, esta fase es el futuro producto a obtener en el proceso y la ácida que contiene sedimentos, restos acuosos y metales pesados, ésta es la de color café en el fondo del recipiente por ser más pesado que el aceite. Otro punto a destacar es que la diferencia de densidad de estas sustancias es alta, en promedio de 1000 kg/m^3 más pesada una que otra, por ende en cuestión de minutos se separan con facilidad.



Figura 8.1. Fases generadas posterior a la reacción entre el ácido sulfúrico y el aceite usado procedente de Moín (Madrigal, 2015).

Dicho aceite se separó a escala de laboratorio por gravedad y se neutralizó con óxido de calcio, luego se centrifugó a 800 rcf velocidad establecida por ASTM para separación de lodos en aceites

usados, y de este modo se separa el agua formada y el resto de sólidos de la base agregada en exceso.

A nivel de laboratorio se tomaron muestras del producto obtenido y se enviaron al laboratorio EXIMPORT S.A., con el fin de medirle las propiedades físico-químicas, contenido de metales pesados y así comparar estos parámetros contra el Búnker C. En el cuadro 8.1 se observa la comparación de estas propiedades.

Cuadro 8.1. Propiedades del producto obtenido a partir del aceite residual y las del Búnker C (Eximport S.A., 2014).

Análisis	Aceite Combustible Obtenido	Búnker C
Temperatura de Inflamación, °C	156	60 min.
Viscosidad a 50 °C, cSt	217,3	635 máx.
Viscosidad a 100 °C, cSt	26,6	/
Temperatura de escurrimiento, °C	2-4	30 máx.
Sedimento por extracción, % m/m	0,93	0,5
Vanadio, ppm	0,01	300
Residuos de Carbon Conradson, % m/m	0,42	20
Densidad a 15 °C, kg/m ³	924	990,4
BSW, % v/v	< 0,05	< 0,05
Poder Calórico, kcal/kg	10 100	9 500
Azufre, % m/m	1,80	1,80
Ceniza, % m/m	2,7 / 0,5	1,0 / 0,5

Del cuadro 8.1 se concluye, que el producto obtenido a partir del aceite residual, es apto para emplearse como un combustible. Su poder calorífico el cual es inclusive más alto al del búnker C. De los parámetros que se compararon, únicamente para el punto de inflamación se aprecia una diferencia significativa, ya que es mayor en aproximadamente 100 °C. Sin embargo, en países europeos como España (CONAMA, 2008), donde se hace uso de estos lubricantes como combustible, lo que se hace es utilizar el combustible convencional, en este caso Búnker C, para el arranque de la caldera o equipo donde se emplea, y luego que se alcanza el estado estable durante la operación, se inyecta el aceite combustible. El aspecto más relevante es que si se observa el análisis de P.T.S solo reporta Vanadio en la mezcla y en una cantidad de 0,1 ppm lo cual cumple con lo que se busca. Se concluye que el tratamiento en cuestión separa de forma correcta los metales pesados del aceite usado y este presenta condiciones mínimas suficientes para ser empleado como sustituto al Búnker C.

8.1. Proceso para la obtención del aceite combustible.

Con base en la información obtenida de la matriz de selección, la investigación realizada, los análisis de laboratorio y el criterio técnico del sustentante; así como las recomendaciones y asesorías por parte del director y los lectores de la presente investigación, se llevó a cabo el diseño del proceso para obtener un combustible a partir del aceite residual, de los barcos que arriban en Moín y descargan dicho desecho en este puerto.

El proceso inicia caracterizando la materia a tratar, luego se continúa con la separación del agua libre, se lleva a cabo un calentamiento del aceite, seguido de una reacción con ácido sulfúrico, nuevamente una separación, pero ahora del lodo ácido, posteriormente un tratamiento con hidróxido de calcio y por último una centrifugación. A continuación, se describe cada una de las etapas, sus condiciones de diseño y las propiedades determinadas para poder tratar el aceite residual.

8.1.1. Caracterización.

Inicialmente se lleva a cabo una titulación con nitrato de plata para determinar el contenido de cloruros en el aceite. En caso de contar con una presencia mayor a 0,2 % v/v, ésta materia prima no ingresa al proceso, ya que puede favorecer la formación de dioxinas y furanos durante su combustión, en este caso el producto se vende tal cuál a alguna cementera, ya que cuentan con hornos de uso directo, en donde las mismas se descomponen en caso de producirse.

Se implementó la norma ASTM D-1796-11, para medir el contenido de agua y sedimento en productos de esta índole, dicha metodología se encuentra resumida en el anexo 2 del presente informe. Una vez arribado el barco, se bombea el desecho hacia una cisterna, luego un camión se lleva el aceite al predio.

Se muestrea el aceite (capítulo 5) y se realizan análisis de BSW. Se espera que el valor en este caso se encuentre dentro del siguiente intervalo $(20,4 \pm 4,6) \%v/v$. En caso de no encontrarse dentro de los límites esperados, se hace un reajuste en el proceso a la hora de separar el agua libre. A ello se debe la importancia de conocer y caracterizar la materia prima antes de ingresar al proceso.

8.1.2. Separación del agua libre.

Se decidió implementar una pila de decantadores, los cuales son tanques de fondo cónico. Dicha agua se envía a un sistema de tratamiento de aguas residuales y el aceite continúa con el proceso. Se hizo una prueba de tiempos de asentamiento, midiendo como variable de respuesta el BSW en el aceite. De modo que así se determinó el tiempo de sedimentación apropiado.

Graficando estos resultados se obtiene la figura 8.2 donde se aprecia claramente que al inicio el cambio en el BSW es muy alto, sin embargo, después del minuto 45 no es significativa su variación ya que se observa una tendencia en la curva a estabilizarse. Por ende, se determinó como tiempo de sedimentación 60 min ó bien una hora para manejar la seguridad de que en ese tiempo el BSW del aceite pasó de un 25 % v/v a un 2 % v/v.

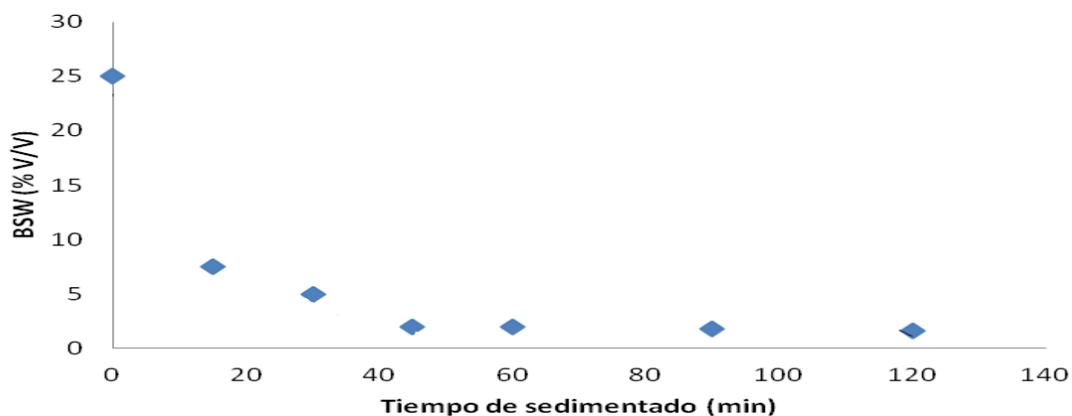


Figura 8.2. Variación del BSW durante el tiempo de sedimentación (Madrigal, 2015).

Se concluye que el tiempo de sedimentación va a ser de una hora, debido a que posterior del minuto cuarenta las variaciones son muy leves, y así se garantiza obtener un BSW del 2 % v/v en el

aceite. De esta manera cuando se lleve a cabo el tratamiento con ácido sulfúrico su consumo va a ser mucho menor.

8.1.3. Calentamiento del aceite.

Posteriormente se cuenta con un intercambiador de calor, el cual sube la temperatura del aceite hasta 50 °C, con el objetivo de favorecer el contacto íntimo de las sustancias durante la reacción y a la vez disminuye la densidad del aceite, ya que estas sustancias orgánicas varían su densidad y viscosidad con los cambios de temperatura. Por ende, se favorecería la etapa de centrifugación, separación del lodo y se obtiene mayor contacto en la reacción gracias a la energía cinética introducida. Todo esto se traduce en una demanda energética menor y en equipos de inferior tamaño.

El intercambiador de calor lo que hace en sí es aprovechar como fluido térmico agua a 80 °C proveniente de un calentador, el cual lo que hace es a quemar Diesel para calentar el agua. Esta se bombea por los tubos, en un intercambiador de coraza y tubos. Se decidió pasar el fluido acuoso por los tubos por el hecho de que esta es la sustancia más corrosiva y eso facilita las futuras labores en mantenimiento. En el capítulo 9 se muestra el dimensionamiento del equipo de modo que se estima el diámetro y cantidad de tubos requerida para llevar a cabo la operación deseada. Los materiales son acero inoxidable debido a la corrosión. Por la coraza pasa el aceite, de modo que se sube la temperatura del mismo hasta 50 °C.

8.1.4. Reacción de limpieza con ácido sulfúrico.

Se procedió a implementar un reactor por tandas, con dimensiones de un tanque agitado estándar. Se alimenta ácido sulfúrico y aceite en una proporción 1 a 10 en volumen, el reactor consta de un agitador de alta viscosidad tipo turbina de 6 aspas inclinadas colocado sobre un eje vertical y cuatro mamparas en el tanque. El reactor se construye en hierro y se recubre en fibra de

vidrio para soportar la carga del ácido sulfúrico. La reacción de limpieza se lleva a cabo en un reactor por lotes o bien sistema por tandas, por dos motivos, primero por tratarse de un diseño preliminar, y segundo por no contarse con información acerca de la cinética del proceso estudiado. De este modo se midió el tiempo de reacción y como variable de respuesta el BSW.

La reacción entre el ácido y el aceite residual se estudió manteniendo constante la concentración de ácido sulfúrico, el ácido tiene una concentración del 98 %. El cual se definió en 10 % v/v respecto al aceite. Para medir la cinética de la reacción de limpieza, o bien determinar el tiempo de operación se realizaron varios experimentos. Donde se tomaban muestras a distintos tiempos de reacción, luego se separaba la fase acuosa de la orgánica, posteriormente se mide como variable de respuesta el BSW en el aceite. El punto en el cual se da por finalizada la reacción, está dado cuando dicho parámetro se mantiene constante y acorde a la normativa de 0,05 % v/v. En la figura 8.3 se muestra el comportamiento del agua y sedimento obtenido a lo largo del tiempo de reacción.

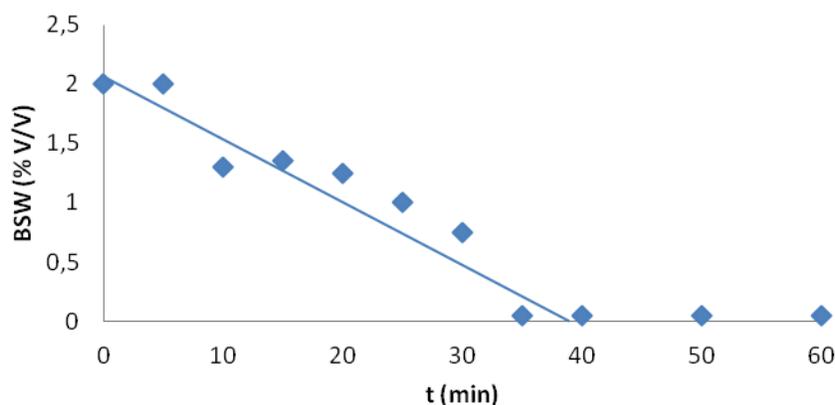


Figura 8.3. Variación del BSW con respecto al tiempo de reacción (Madrigal, 2015).

Como se puede observar en la curva de la figura 8.3, después del minuto 40 los resultados del BSW son idénticos, por seguridad se decidió que el tiempo de reacción sea de 1 hora, ya que como se ha explicado en ocasiones anteriores este proceso puede resultar altamente variable, debido a la complejidad de la materia prima. Ajustando los datos de la figura 8.3, se obtuvo una correlación que describe como varía el mismo con respecto al tiempo. En la ecuación 8.2 se muestra dicho cálculo.

$$\text{BSW} = -0,0498 t + 2,0833 \quad (8.2)$$

Donde: BSW: Contenido de agua y sedimento básico, %V/V.
 t: Tiempo, min.

Dicho ajuste de datos presenta un coeficiente de correlación de 0,91 el cuál describe el proceso de limpieza del aceite residual en el tiempo hasta el minuto 40.

8.1.5. Sedimentación para separar el lodo ácido.

Al igual que la etapa de separación del agua libre, se seleccionó una pila de decantadores idénticos a la sección 8.1.2 ya que se tiene una diferencia de densidad aún mayor. Para estimar el tiempo de sedimentación en los fondos cónicos se procedió a realizar el mismo experimento que se hizo en la sección 8.1.2, los datos medidos se muestran en el cuadro A.6.

Posteriormente al graficar dichos datos en la figura 8.4 se obtuvo un modelo que ajuste la velocidad de separación y el tiempo de residencia que debe de brindársele a la mezcla ácida para lograr su separación. Si se observa la figura 8.4 se observa que después del minuto 10, las variaciones de separación no son significativas, por ende, se estimó que el tiempo de separación para el ácido del aceite debe ser de 15 min para tener un factor de seguridad de que el contenido de lodos ácidos en el aceite es de 0,50 % v/v.

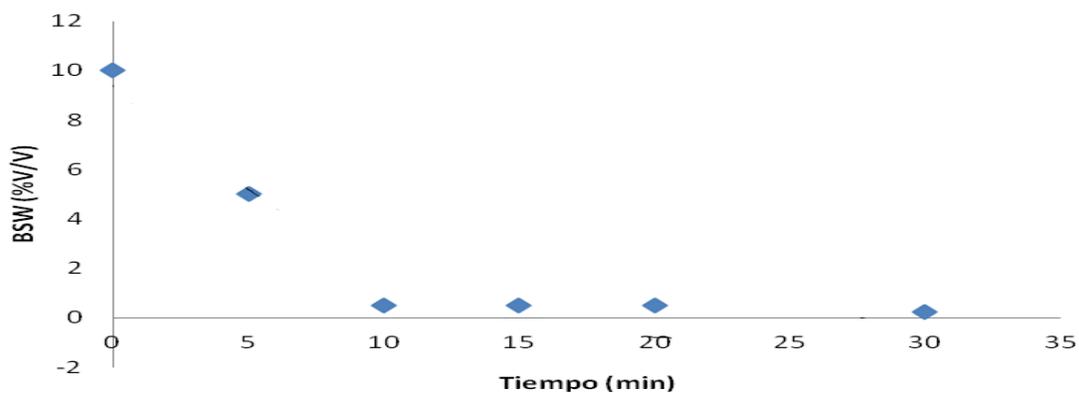


Figura 8.4. Variación del BSW con respecto al tiempo de sedimentación del ácido sulfúrico (Madrigal, 2015).

Se concluye que el tiempo de separación debe ser de 15 min. Se tiene una interfase entre la fase ácida y el aceite. En esta etapa se tiene una pérdida del 0,5 % v/v de aceite durante la separación de la interfase, ya que es preferible garantizar la separación máxima posible del ácido, aunque se pierda una cantidad orgánica para minimizar los costos de neutralización.

Esta etapa se coloca porque posteriormente sigue una neutralización del aceite, y para evitar consumos excesivos de sustancias con comportamiento básico se prefirió colocar dicha etapa en este punto del proceso. Además, no habría que recurrirse en equipos nuevos, ya que se pueden emplear los mismos de la primera etapa, ya que en este punto están desocupados y como se verá en el capítulo 9 de dimensionamiento de los mismos, funcionan de igual forma en ambos casos.

Desde un punto de vista técnico la diferencia de densidad en ésta matriz ácido-aceite es mayor que la de BSW-hidrocarburo, por ende, se justifica que se puedan emplear ya que éstos fueron diseñados para la opción con menor fuerza motriz.

Los desechos de ácido sulfúrico como se observa en la sección 8.3 serán tratados mediante la formulación de una pintura color negro, en base de aceite, para pintar madera, donde los metales pesados quedan encapsulados.

8.1.6. Neutralización.

El aceite se hace pasar por una cámara de mezclado donde se le adiciona óxido de calcio. El cual presenta las ventajas de ser fácil de manejar, económicamente accesible y lo suficientemente básico, para neutralizar las trazas de ácido que puedan estar remanentes en el producto. Además, favorece la etapa posterior de centrifugación. Es muy importante estimar con certeza la cantidad por agregar de cal al aceite, primero para no sobreestimar el gasto de dióxido de calcio y segundo porque si no se neutraliza esto genera problemas durante la combustión del lubricante.

Posterior a la sedimentación donde se separa el ácido sulfúrico, se descarta por seguridad un 0,5 %v/v de aceite con el fin de dejar el mismo sin ácido. Sin embargo, siempre quedan trazas de ácido en el mismo. Para ello según la metodología ASTM D2896 (ASTM, 2011), se llevó a cabo una

titulación con ftalato ácido de potasio. Cabe destacar que, al ser una sustancia orgánica, el contenido ácido se determina en mg KOH /g muestra. Estas unidades lo que indican es la cantidad de base que debe de adicionarse para neutralizar el lubricante.

Según ASTM el número ácido debe ser como máximo 55 mg KOH/g. Para estimar la cantidad de cal por adicionar en el proceso se hicieron 5 pruebas al aceite usado producto de la reacción después de separarle el ácido sulfúrico, estos resultados se muestran en el cuadro 8.2. Se hizo variando el contenido de cal adicionado respecto a la masa de aceite.

Cuadro 8.2. Acidez del aceite al agregarle KOH en diferentes cantidades (Madrigal, 2015).

Cantidad de Cal agregada (%m/m)	Acidez antes de adicionar Cal (mgKOH/g)	Acidez después de adicionar Cal (mgKOH/g)
1,00	85,50	77,25
2,00	85,50	57,25
3,00	85,50	32,50
4,00	85,50	31,50
5,00	85,50	30,50

Las corridas se hicieron con un tiempo de reacción de 1 hora, posteriormente se determinó el tiempo y el contenido de cal para llevar a cabo la operación. Por cuestiones de seguridad se recomienda implementar cal en un 3 % m/m respecto al aceite usado en la cámara de mezclado, ya que como se observa en el cuadro 8.4, cuando se emplea un 2,00 %m/m se está muy cerca de cumplir con la especificación de 55 mgKOH/g. Y si se observa al emplear un 3,00 %m/m ya se cumple con lo estimado, por ende, se seleccionó dicho porcentaje. La cual se adicionada manualmente por ser sólida y se deja en agitación tipo batch por un tiempo de 20 minutos. Para determinar el tiempo de neutralización se hizo una corrida adicionando el 3,00 %m/m de cal y se tomaron muestras a distintos tiempos de mezclado, estos se muestran en el cuadro 8.3.

Cuadro 8.3. Acidez del aceite a distintos tiempos de neutralización para 3,00 %m/m de cal (Madrigal, 2015).

Tiempo (min)	Acidez (mgKOH/g)
0	85,50
15	31,50
30	31,50
45	31,50

Se determinó un tiempo de mezclado de 20 min porque tal como se observa en el cuadro 8.5, después de adicionar la cal desde el minuto 15 en adelante los resultados son exactamente los mismos, por lo tanto, se planteó en 20 min con la finalidad de tener seguridad de haber alcanzado la neutralización deseada. En cuanto a dimensiones de las cámaras de mezclado, se implementa y utilizan los mismos tanques estándar agitados utilizados para el tratamiento con ácido sulfúrico. Con esta etapa solo haría centrifugación final del producto para separar el agua que se forma de la neutralización y el exceso de cal.

8.1.7. Centrifugación.

Se implementa una centrifugadora que se encargue de separar los posibles lodos remanente en el aceite de las demás etapas, así como el agua formada durante la neutralización del aceite, exceso de cal y sólidos suspendidos. La fase que se separa es la orgánica, la cual es el aceite listo para ser empleado como combustible.

Existen dos tipos de centrifuga que pueden emplearse en el presente proyecto. La trifásica o Tri-decanter que lo que hace es separar, la fase aceitosa, la ácida y los sólidos. Y la bifásica ó de tambor que separa el aceite de lo demás. En esta última cada cierto tiempo deben de limpiarse las paredes del equipo por sólidos que puedan quedar adheridos. Para minimizar costos de inversión se empleará la segunda opción. Ya que una centrifugadora Tri-decanter cuesta al menos un 50 % más que una de tambor.

Entre los cuidados importantes, estos equipos operan de manera correcta si los sólidos no superan el 5 % m/m de la materia a tratar, para este caso este no es un inconveniente ya que el valor de sólidos suele ser inferior al 2 % m/m.

Cabe destacar que la escogencia de este sistema sobre otros, se basó en su eficiencia y tiempo de operación para purificar el aceite de sus contaminantes. En cuanto a las condiciones de mantenimiento, requiere la eliminación manual de partículas sólidas. En esta etapa se pierde en total un 4 % m/m de aceite procedente de la cámara de mezclado, en el cual se contemplan suciedades y restos de cal que se encontraban en el producto procedente a la neutralización. El

4 %m/m se conoce gracias a las especificaciones de la centrifugadora bifásica consultada y cotizada en el capítulo diez del presente. Para finalizar se vuelve a medir el BSW del producto el cual debe ser igual o menor al 0,05 % v/v.

De este modo el producto se almacena listo para ser vendido como un combustible alternativo al Búnker C, con el cuidado de emplear durante el arranque y la estabilización de los equipos un hidrocarburo convencional.

Cabe destacar que los desechos en este caso se suman junto con los de la sedimentación anterior y se tratan en el proceso de la producción de una pintura color negro, como se observa en la sección 8.3.

8.1.8. Resumen del proceso y tiempos de operación.

En la figura 8.5 se muestra un diagrama de bloques del proceso diseñado en la presente investigación, el cual nos sirve para entender más fácil el proceso, y en la página 70 se muestra el diagrama de flujo de proceso (DFP) completo, junto con los balances de masa y energía.

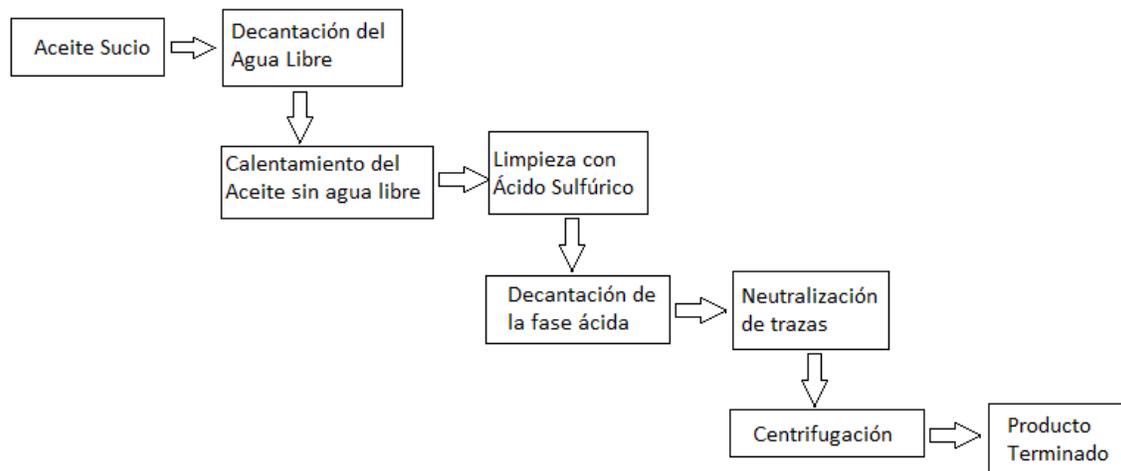


Figura 8.5. Diagrama de bloques del proceso diseñado para la obtención de un combustible a partir del aceite residual de los barcos que arriban en Moín (Madrigal, 2015).

Se explica a continuación el proceso diseñado, las tandas requeridas para llevar a cabo la limpieza de 600 000 litros mensuales en una jornada laboral de 8 horas. En cuanto al tamaño de equipos y dimensiones de los mismos, estas pueden ser consultadas en el capítulo 9 además en los apéndices se encuentra la muestra de cálculo de cada uno de estos cálculos.

El proceso se lleva a cabo en dos tandas al día para minimizar el tamaño de los equipos y en dos sistemas en paralelo con el mismo fin de reducir la inversión. Éste inicia con la carga del aceite residual a cuatro decantadores, se hace uso de dos bombas de desplazamiento positivo con una capacidad para trasegar $0,009\ 46\ \text{m}^3/\text{s}$. Esta etapa de carga de los equipos demora 30 min, debido a que las bombas se diseñaron para ese tiempo de operación, esos resultados se aprecian en el capítulo 9.

Se deja separar el agua libre del aceite por un periodo de una hora en los decantadores, tal como se estimó con la prueba de la probeta, se descarta la fase acuosa y se procede a almacenar el aceite decantado en un tanque para mantener un control del resto de las etapas.

Posteriormente el aceite sale del tanque con un contenido de agua y sedimento del 2 % v/v. Resultado obtenido después de 1 hora de sedimentado en la probeta y el cual no varía. Pasa por un intercambiador de calor, de coraza y tubo, el cual emplea como fluido térmico agua caliente, con el fin de llevar el aceite a $50\ ^\circ\text{C}$ y así facilitar el contacto entre las fases y su posterior separación, debido a que el aceite caliente disminuye su densidad en mayor magnitud que la fase acuosa.

Una vez caliente, el aceite con ayuda de un sistema de bombeo análogo al de la sección anterior se procede a llevar a cabo la reacción de limpieza con ácido sulfúrico. Para ello se cuenta con dos reactores. Se alimenta un 10 % v/v de ácido respecto al aceite. La operación de alimentación del aceite y ácido al reactor se tarda 30 min, de igual forma el sistema de bombeo se diseño y se observa en el capítulo 9, mientras que la reacción demora 1 hora, tal como se vio en los resultados al medir la cinética de limpieza.

Continuando con el proceso posterior a la reacción se lleva a cabo una sedimentación del lodo ácido, se descarta con un tiempo de residencia de 20 min, el cual se determinó experimentalmente. Para esta operación se emplea el mismo set de decantadores de la separación inicial, ya que en este punto no se encuentran en uso y los mismos cumplen para la

operación deseada ya que su fuerza motriz es mucho mayor (Mayor a 100 % de diferencia en densidad entre los fluidos). El aceite se recupera y alimenta a un tanque agitado, donde se le adiciona cal en un contenido de 3 % m/m respecto al aceite centrifugado, para neutralizar los restos ácidos en el aceite. El contenido de cal por adicionar se estimó variando la cantidad de base y midiendo la acidez como variable de respuesta.

Por último, se pasa el aceite por una centrifugadora bifásica, donde se separa el agua formada de la centrifugación, así como los sólidos y lodos remanentes de las demás operaciones previas. En este punto se pierde en total un 4 % m/m de la mezcla de aceite que se está limpiando, y el mismo queda en condiciones aptas para su disposición como combustible. Se le mide el BSW, el cual es inferior al 0,05 %v/v y metales pesados para corroborar que se dio el tratamiento de forma correcta.

En el gráfico de Gantt, mostrado en la figura 8.6, se muestran los tiempos de operación de las tandas con las cuales se tratará la producción diaria de la limpieza del aceite residual para obtener el combustible. Se muestra en amarillo un set de equipos y en verde otro, de modo que se consideran dos líneas de producción paralelas. Si se observa la figura se nota que no hay choque de horario ni de uso de los equipos, por ende, desde un punto de vista operativo el proceso es viable.

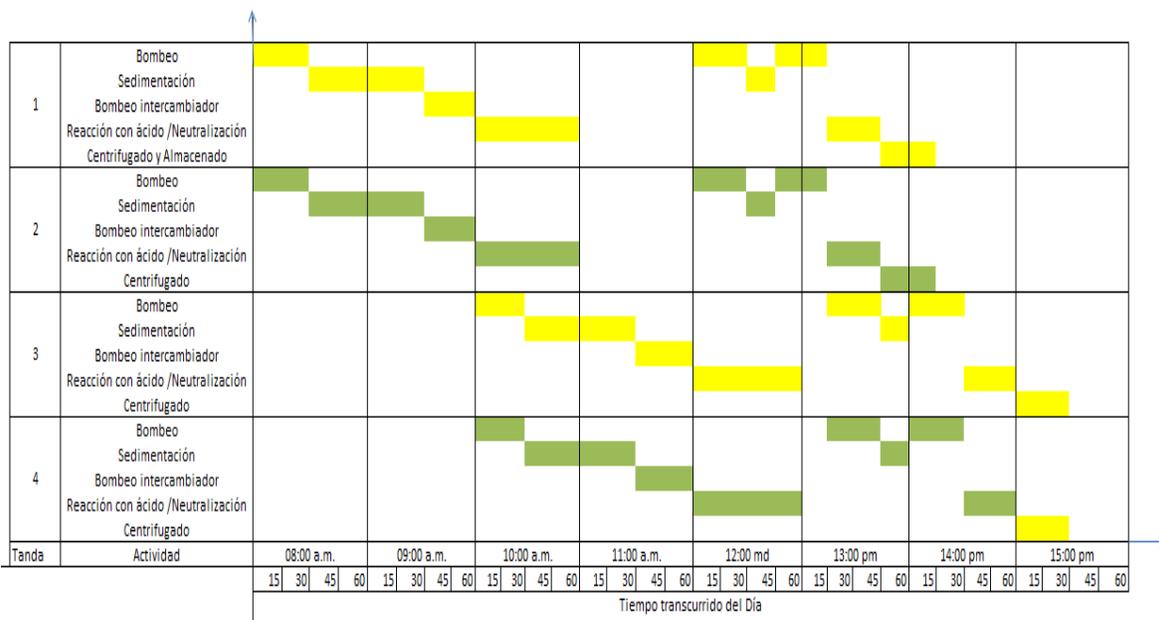


Figura 8.6. Gráfico de Gantt con los tiempos de operación del proceso diseñado (Madrigal, 2015).

Se concluye del gráfico, que, en cuanto a tiempos de operación, el proyecto presenta viabilidad, debido a que, con los equipos propuestos, en una jornada laboral de 8 horas, se logra llevar a cabo el tratamiento de todo el aceite residual. Las zonas vacías en el gráfico de Gantt se deben a que en ese punto el equipo requerido se está ocupando en la otra tanda, por ende, no se inicia su bombeo a la siguiente etapa. Cabe destacar que esa operación no afecta en nada la calidad del producto. Por otra parte, como se observa en el gráfico de Gantt para la tanda uno queda un lapso de una hora y 45 minutos, en ese transcurso de tiempo se llevan a cabo labores limpieza de los equipos y se dejan preparados para el día entrante. En cuanto a la tanda dos, queda únicamente 30 min dedicados a limpieza, sin embargo, en este batch solo faltaría por limpiar la centrifugadora, el cual es tiempo suficiente para poder llevarlo a cabo.

8.2. Tratamiento de aguas residuales.

El diseño de este proceso, involucra directamente tener que contar con algún sistema de tratamiento de aguas residuales. Esto con el fin de poder cumplir con las especificaciones del reglamento de vertido y reúso de aguas que rige en el país. Si bien no está en el alcance de la presente investigación, se recomienda para futuros proyectos, llevar a cabo el diseño de la misma. Sin embargo, sí se van a comentar algunos tratamientos para el caso de aguas residuales provenientes de materias de esta índole y sugerir alguna alternativa.

Entre los equipos que se pueden implementar una posibilidad es un coalescedor, el cual se encarga de reducir el contenido de aceites en las muestras. La materia acuosa-orgánica ingresa al coalescedor, por medio de una bomba de diafragma, ya que si se utiliza una centrifuga u otra pueden favorecerse la formación de emulsiones (Patiño, 2005).

El coalescedor puede ser un tanque construido en PVC ó Polietileno empacado internamente para remover la fase discontinua de la continua, los sólidos se asientan y las gotas de aceite tenderán a subir a la superficie e irse juntando, además como la mezcla viaja por un tanque dificultando su paso con un empaque es que se tiende a favorecer la separación de las gotas de aceite del agua. Sin embargo, no se logra separar por completo (Patiño, 2005).

En caso de no lograr retirarse por completo la fase orgánica, se tiene la posibilidad de implementar una unidad de oxidación avanzada, la cual consta de dos partes. La primera es una unidad DAF, que lo que hace es mediante la flotación en un tanque favorecer la separación del aceite del agua. Y segundo la unidad de oxidación, mediante ozono y luz ultravioleta, junto a las micro-burbujas de aire producidas por el DAF, logran convertir la materia orgánica en biodegradable. Y así los contaminantes tienden a flotar. Estos se separan y la muestra acuosa solo tendría algunas partículas y un exceso de ozono, ya que es requisito en el sistema de oxidación avanzado (Patiño, 2005).

Como se requiere de ozono en la metodología anteriormente mencionada, hay que optar por implementar la utilización de un generador de ozono, y se recomienda que los tubos sean de cuarzo, con una lámpara de luz ultravioleta para favorecer en el DAF la generación de la materia biodegradable. El principio por el cual funciona ese sistema, es que se genera el radical OH^\cdot al accionar fotones con ozono en agua. Así ya se cuenta con un sistema capaz de oxidar la muestra en tratamiento, se trabaja con exceso de ozono para asegurar su rendimiento y vertido correcto, por lo tanto al finalizar debe pasarse por un filtro para eliminar el exceso de éste ya que es una sustancia nociva (Patiño, 2005).

Por último, está el sistema de filtrado. Se basa en una membrana semipermeable empacada en forma espiral, esta se diseña de acuerdo a los requerimientos y hasta donde se requiere afinar el agua, a este equipo se le conoce como un fraccionador y no siempre se requiere su uso cuando el agua únicamente debe cumplir con el vertido, sin embargo, para ello se hacen las pruebas de laboratorio. Cabe destacar que es una etapa costosa ya que las presiones de trabajo son altas al tratarse del uso de una membrana para favorecer la difusión de las partículas a través de esta (Patiño, 2005).

Para concluir con esta sección, aunque el objetivo del proyecto no es el diseño de un sistema de tratamiento de aguas para el proceso, es importante saber si tienen solución los desechos, porque en caso de no poderse tratar, no tendría sentido diseñar un método para el aprovechamiento del aceite.

Sin embargo, en el presente caso, los desechos tóxicos y más peligrosos se separan en la centrífuga y por lo tanto el agua que se va a tratar, tiene su reto principal en requerir la separación de grasas. Básicamente es agua libre proveniente de la mezcla al extraerla de los barcos y

separarla en los decantadores. Por ende, se cree que únicamente con una unidad DAF puede alcanzarse el nivel requerido. También se obtiene un agua residual del intercambio calórico, la cual únicamente requiere enfriarse para descartarla. Sin embargo, no se descarta la necesidad de implementar el sistema de oxidación avanzada, para ello sería necesario llevar a cabo pruebas en un laboratorio en dichas aguas residuales. Por lo tanto, se hace énfasis en llevar a cabo una segunda investigación, en donde se plantee el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para dicha materia.

8.3. Tratamiento del lodo ácido cargado con metales pesados.

El tratamiento de metales pesados y los desechos ácidos, obtenidos posterior a la centrifugación, suele basarse en incineraciones o encapsulaciones bajo tierra. Sin embargo, una alternativa es darles un uso, en el cual su riesgo de contaminación al medio se vea minimizado. Se decidió reaprovechar dicho subproducto en algún sub-producto con el cual estos se mantengan adheridos y no causen impactos sobre el medio.

Entre las principales alternativas que se manejan para su aprovechamiento están: a) emplearlo como aditivo para favorecer la penetración del asfalto en la producción de emulsiones, b) diseñar una pintura para maderas de color negro ya que resulta una fuerte parte de la materia prima para su creación (Delgado & Parra, 2007).

De las opciones que se manejan, se decidió emplear la formulación de una pintura, ya que en cuanto a mercado este presenta una ventaja sobre su utilización en emulsiones asfálticas. Además, se buscaron posibles clientes a este desecho, se hizo la consulta sobre su posibilidad de uso, con el fin de confirmar que sí es una alternativa. Entre ellos se consultaron: pinturas Rocket en Cartago y pinturas Super Color 10 en Guápiles.

Desde un punto de vista legal en el país, la materia en cuestión no será vendida, si no que se tratará como un residuo, el cual se maneja como una donación al ser un insumo para otro proceso. Por ende, se procede a donar y de esta manera no se incurre en la necesidad de tratar los metales pesados. Otro detalle relevante es que no se instalará un tanque para ello, se equipará

una cisterna de aceite, con un recubrimiento interno en fibra de vidrio, donde se descargue el producto de la centrifugadora directamente, de modo que no se permita ninguna lixiviación de estas sustancias sobre el medio.

9. BALANCES DE MATERIA, ENERGÍA Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS.

Para estimar los balances de materia y energía se requiere conocer las propiedades fisicoquímicas de las sustancias o mezclas que se emplean durante el proceso. Por ende, es necesario conocer la temperatura y presión atmosférica promedio del lugar, ya que éstas varían conforme cambian las condiciones climáticas. Para ello se visitó la página web del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y se consultaron las temperaturas promedio mensuales del año 2013, de modo que se estimó un valor de temperatura promedio para Moín. Esta información se puede ver en el cuadro 9.1. En la sección de anexos se muestran las condiciones mensuales consultadas con las cuales se hizo dicha estimación.

Cuadro 9.1. Temperatura y presión promedio de Moín (IMN, 2013).

Temperatura(°C)	Presión (kPa)
25,9	101,3

De este modo las condiciones ambientales para el diseño del proceso van a ser una temperatura de 25,9 °C y una presión atmosférica de 101,3 kPa.

Los balances de materia y de energía, en el diseño de un proceso, tienen un papel de suma importancia, porque a partir de sus resultados se obtiene la cantidad de producto generado, el insumo de materia prima requerida, el consumo energético y con esa información se permite dimensionar los equipos que se requieren. Un balance responde a la ecuación general 9.1.

$$\text{Acumulación} = \text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Generación} - \text{Consumo} \quad (9.1)$$

Para determinar las corrientes del proceso y sus respectivos flujos másicos se llevaron a cabo balances de materia de una sustancia en específico o globales alrededor de los distintos equipos, definiendo las condiciones de frontera en cada caso y así se obtuvo la información deseada. En el apéndice C, sobre la muestra de cálculo, se detalla cómo se obtuvieron los valores de las corrientes de proceso. En el presente capítulo se describirán y comentarán dichos resultados. Las

corrientes de proceso pueden observarse en el DFP. En el cuadro 9.2 se muestra un resumen con los flujos másicos de las corrientes obtenidas a partir de los balances de materia y energía.

Cuadro 9.2. Flujos másicos de las corrientes del proceso (Madrigal, 2015).

Corriente	Flujo másico ($\pm 0,000 5$ kg/s)
F1	6,520 8
F2	1,250 3
F3	5,270 5
F4	5,270 5
F5	0,527 1
F6	5,797 6
F7	0,237 1
F8	5,560 5
F9	0,166 8
F10	5,727 3
F11	5,388 1
F12	0,339 2
F13	3,000 0

Para el caso de la corriente F1, se tomó como dato la materia que se desea procesar mensualmente, en la sección 6 se determinó que la planta debe ser capaz de tratar 600 000 litros en un mes. Por ende para definir el flujo lo que se hizo es convertir dicho valor en kilogramos por segundo, tomando en cuenta que solo se trabajan seis días de la semana y únicamente se tendrá un turno de ocho horas. Obteniendo una corriente. Ahora el flujo como tal está determinado según el tiempo de trasiego en el proceso en sí, por ende se decidió implementar dos bombas para que las mismas sean de un menor tamaño y poder llevar a cabo la transferencia de materia en un lapso promedio de media hora entre equipos. La corriente F1 tiene un flujo de 6,520 8 kg/s, su cálculo puede verse en el cálculo C.1 del apéndice C.

Cabe destacar que no se planteó colocar un tanque inicial, ya que una vez estimado el BSW del lote, se conectan ambas bombas de desplazamiento positivo a la cisterna propiamente. El fluido se lleva a una pila de cuatro decantadores, del mismo salen dos corrientes F2 y F3. De pruebas hechas en el laboratorio de Ingeniería Química, mostradas en el capítulo 8, se estimó que el tiempo de sedimentación debe ser de una hora, además se estima que el aceite decantado posterior a la operación aún contiene un BSW de 2 % v/v.

Para encontrar los flujos que salen de los decantadores, se planteó fue un balance de agua y sedimento, ya que a la entrada se tiene un 20,6 % v/v, mientras que el aceite a la salida contiene un 2 % v/v. Por ende, si se combina este balance con el global de materia en el equipo en cuestión, se obtienen los flujos F2 y F3, los cuales tienen una magnitud de 1,250 3 kg/s y 5,270 5 kg/s respectivamente. El cálculo anterior se aprecia en la muestra de cálculos adjunta.

Los decantadores se dimensionaron de acuerdo a la necesidad del presente proyecto. Para ello se requiere un sistema de forma cilíndrica con un fondo cónico. Se escogió como material hierro, con un recubrimiento en fibra de vidrio para prevenir la corrosión. La vida útil de los mismos se estima en veinte años.

En la figura 9.1 se muestra un diagrama del sistema de separación con sus dimensiones planteadas. Cuenta con una salida por el fondo del tanque para separar el agua libre y lodos, la cual se tratará y posteriormente se vertía, acorde con la legislación nacional pertinente. En la parte superior a la interfase entre el aceite y la fase acuosa, se cuenta con otra salida, está equipada con una bomba encargada de trasegar el aceite, el cual sale con un BSW del 2 % hacia un tanque de almacenamiento de producto decantado, para poder mantener las demás operaciones de manera más adecuada.

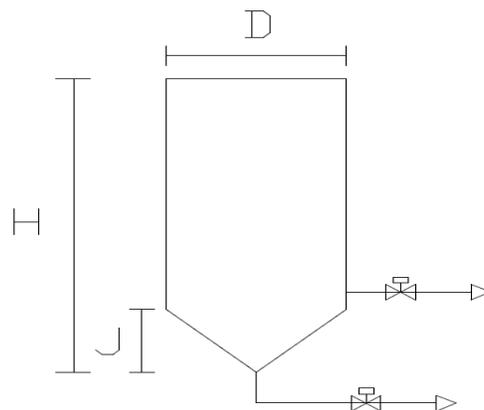


Figura 9.1. Separador de agua libre para aceite residual diseñado (Madrigal, 2015).

El equipo funciona de manera por lotes, el residuo se alimenta en su totalidad al decantador, se deja reposar por un lapso de una hora, como se determinó en el capítulo 8. Se bombea el aceite a la siguiente fase del proceso y se separa el agua por el fondo del sistema. El volumen de diseño fue

de $3,75 \text{ m}^3$ ya que se instalarán cuatro equipos, para operar dos tandas por día, con un factor de seguridad del 80 %, para prevenir rebalses y así procesar los 25 m^3 requeridos. Estos cálculos se presentan en el apéndice C sobre la muestra de cálculo. Este equipo se cotizó con la empresa Río Verde del Caribe S.A, y los mismos lo construyen e instalan en Moín. Las dimensiones se muestran en el cuadro 9.3.

Cuadro 9.3. Dimensiones de los parámetros de los decantadores diseñados (Madrigal, 2015).

Parámetro	Dimensión (m)
H	2,7
J	0,8
D	1,2

Luego se tiene un intercambio de calor, que subirá la temperatura del aceite a $50 \text{ }^\circ\text{C}$, en la figura 9.2 se muestra el diagrama del equipo diseñado para tal fin. La idea del intercambio calórico es favorecer el contacto de las fases y así reducir la densidad del aceite de modo que se reduzca el tamaño de los equipos de separación posteriores, como lo es la centrifugadora al final del proceso.

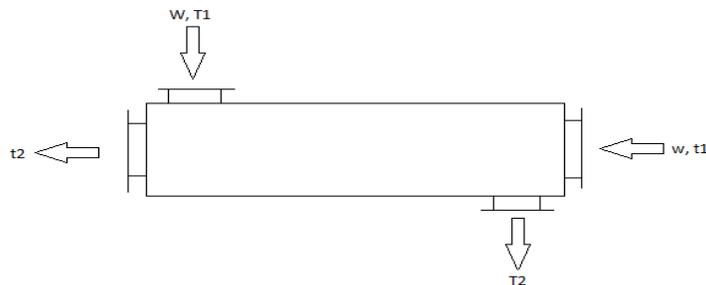


Figura 9.2. Intercambiador de calor para subir la temperatura a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ del aceite (Madrigal, 2015).

Cabe destacar que en este equipo solo se da una transferencia energética, por ende, el flujo másico que ingresa va a ser el mismo que sale, de modo que la corriente cuatro tiene el mismo valor en flujo másico que la corriente tres.

Se cotizó un calentador de agua en servicios técnicos, ubicado en San José, para poder disponer del fluido térmico al equipo. Se realizó el balance de energía para determinar el consumo de combustible por tanda diaria, como se puede observar en el cálculo C.30 se requieren 185 litros de

diesel, en un futuro se puede evaluar emplear el mismo aceite como combustible. En el cuadro 9.4 se resumen los parámetros diseñados para este equipo.

Cuadro 9.4. Parámetros diseñados para el intercambiador de calor (Madrigal, 2015).

Parámetro	Resultado
Tipo de intercambiador	1-2
Diámetro coraza (m)	0,793 8
Diámetro tubos(m)	0,019 1
Largo de tubos (m)	6
Número de tubos (Adimensional)	324
Tipo de arreglo (Adimensional)	Cuadrado
Caída de presión (kPa)	36,25
Factor de ensuciamiento, Rd (Adimensional)	0,0075

El equipo es un intercambiador de calor de coraza y tubo, en acero inoxidable, con un paso por la coraza y dos por los tubos, con un diámetro de coraza de 0,793 8 m, dispone de un arreglo cuadrado para facilitar la limpieza y mantenimiento del mismo, con 324 tubos de 0,019 1 m. Las demás dimensiones pueden observarse en el cuadro B.3 ubicado en el apéndice de resultados intermedios. Cabe destacar dos aspectos la caída de presión por ser inferior a 75 kPa cumple con el diseño, el factor de ensuciamiento por ser positivo con un valor de 0,007 5 puede llevar a cabo la operación planteada. Se analizaron otros intercambiadores y estas condiciones anteriormente mencionadas fueron las que cumplieron con los requisitos. Por otra parte, el fluido térmico se hace pasar por los tubos, para favorecer la limpieza y posibles daños debido a que el agua se considera una sustancia muy corrosiva.

La siguiente etapa es el sistema de reacción, el cual se muestra en la figura 9.3.

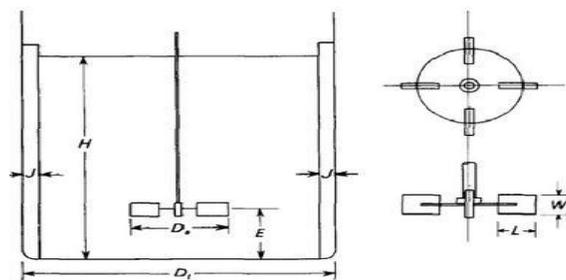


Figura 9.3. Reactor batch con dimensiones de un tanque agitado estándar (Mott, 2006).

Al sistema se le alimenta el aceite caliente y ácido sulfúrico al 98,0 % m/m. Se estimó por seguridad llevar a cabo la operación por un lapso de una hora, dicho tiempo se determinó en el capítulo 8. Como es veré al final del proceso, el aceite contiene un BSW del 0,05 % v/v, como ya se comentó con ese valor puede catalogarse como un aceite combustible. Experimentalmente se observó que con un lapso de reacción de una hora y una alimentación de 10 % v/v de ácido sulfúrico se logran obtener las condiciones deseadas en el producto final, posterior a las etapas de purificación.

Cabe destacar que la cantidad de ácido sulfúrico, para satisfacer la reacción y tener un factor de seguridad en el cual se garantice la separación de todos los compuestos organometálicos y otros solventes, así como sustancias emulsionadas en el aceite, es de 10 % v/v respecto al aceite que se alimenta, esto se determinó gracias a estudios realizados donde se emplea esta tecnología y se corroboró en la presente investigación, llevando a cabo varias reacciones donde se variaba dicho contenido, se observó que para un 5 % v/v de ácido no se alcanza en el producto el BSW mínimo de 0,05 % v/v, mientras que para los contenidos de 7 % v/v en adelante si se logra obtener un BSW menor al mínimo. Por seguridad se diseñó el proceso con una relación de alimentación del 10 % v/v de ácido sulfúrico respecto al aceite alimentado. Estos resultados pueden observarse en el cuadro B.3. Por ende, el flujo F5 que se refiere al ácido sulfúrico es de 0,527 1 kg/s.

Para dicha operación se emplean dos reactores en paralelo, y como se manejan dos tandas diarias, se requiere contar con un volumen de 7,5 m³ cada uno, el cual contempla el hecho de estar a un 80 % de su capacidad cuando opera, para prevenir cualquier rebalse o problema técnico, así como por factores de seguridad. Al emplear las reglas de diseño para reactores batch donde se asume que sus dimensiones son las de un tanque agitado estándar se obtuvieron las dimensiones mostradas en el cuadro 9.5.

Cuadro 9.5. Dimensiones de los reactores diseñados (Madrigal, 2015).

Parámetro	Dimensión (m)
Altura del tanque, H	2,00
Diámetro del tanque, Dt	2,00
Diámetro del agitador, Da	0,70
Longitud de mamparas, J	0,17
Altura del fondo al agitador, E	0,70
Ancho de agitador, W	0,14

Por cuestiones de favorecer el contacto entre las fases, a parte del calentamiento, se decidió emplear cuatro mamparas y un agitador tipo turbina de seis aspas inclinadas, debido a la viscosidad de las sustancias. Se recomienda para esta una velocidad de agitación de 350 rpm (Ramírez J. , 1994). Se estimó a partir de las figuras del libro y metodología estudiada en el libro, Mecánica de Fluidos (Mott, 2006), la potencia del agitador en 18 762 Watt. El flujo másico que se produce, se obtuvo con un balance de materia y tiene un valor de F6 de 5,797 6 kg/s.

Continuando con el proceso para la obtención del combustible, se tiene otro conjunto de decantadores, los cuales como se estimó en el capítulo 8, tienen la ventaja de presentar un tiempo de separación menor, de 20 minutos. Lo anterior se debe a la diferencia de densidades tan grande entre el ácido y el aceite. De esta etapa se obtiene un flujo de aceite que continúa a la etapa de neutralización F8 de 5,560 5 kg/s y un lodo ácido F7 de 0,237 1 kg/s. El set de decantadores va a ser el mismo que el primer set. Como se vio en el gráfico de Gantt del capítulo 8, se consideró este factor para las tandas y para los tiempos de operación.

Luego de la etapa de separación del lodo ácido se procede a neutralizar el aceite con el fin tener el producto listo para purificar de lodos y sólidos en la centrifugadora final. En esta etapa se tienen dos cámaras de mezclado con las mismas dimensiones que los reactores donde se lleva a cabo la reacción con ácido sulfúrico. Deben ser del mismo material hierro con recubrimiento en fibra de vidrio para soportar el efecto corrosivo del ácido.

En el capítulo 8 se determinó el tiempo de agitación, el cual debe ser de 20 minutos y el flujo de óxido de calcio que debe de adicionarse. En este caso se hizo un balance de materia y se obtuvo que de acuerdo al requerimiento de 3,00 % m/m respecto al aceite alimentado de cal para neutralizar el producto, se tiene un flujo F9 de 0,166 8 kg/s. Mientras que en la salida de la cámara de mezclado se tiene un flujo F10 de 5,727 3 kg/s.

Por último, se tiene una centrifugadora bifásica. En esta se separarán los restos de lodo y agua posterior a la neutralización del aceite con óxido de calcio. En esta última etapa el aceite sale con un BSW del 0,05 % v/v. En las paredes del equipo quedarán partículas sólidas que deben de limpiarse manualmente. En este punto el aceite se encuentra en condiciones de ser usado como combustible, ya que se le han separado los contaminantes que afectan su operación (metales pesados, lodo, agua y partículas sólidas).

Con ayuda de la metodología propuesta en *Perry's of Chemical Engineering Handbook* (Perry & Green, 1999), se dimensionó el tamaño y potencia de la centrifugadora que debe de instalarse. De modo que se facilite su adquisición.

El material de la misma debe de ser en acero inoxidable, para soportar el efecto corrosivo de los lodos que se están separando. En el cuadro 9.6 se muestran la potencia y diámetro de la centrifugadora requerida. La misma se diseñó para una operación a 800 RCF, la cual es una recomendación para la separación de agua y lodos en los aceites combustibles según las metodologías ASTM (ASTM, 2013).

Cuadro 9.6. Dimensiones y características de la centrifugadora (Madrigal, 2015).

Parámetro	Dimensión
Tipo	Tambor o Bifásica
Diámetro (m)	1,78
Potencia (W)	2 170

De la centrifuga salen dos corrientes, F11 con un flujo de 5,388 1 kg/s de producto que continua su proceso hacia un tanque de almacenamiento; y F12 con un flujo de 0,339 2 kg/s de lodo el cual se va a emplear como base para la realización de una pintura de color negro para madera como sustrato.

Por otro lado, se tienen otros equipos que se diseñaron pero que no dejan de ser importantes para poder llevar a cabo el proceso, estos son los tanques de almacenamiento, las bombas de trasiego y la selección de tubería.

Los tanques que se requieren instalar son tres, uno para el producto terminado, otro para aceite decantado y uno para el ácido sulfúrico. En todos los casos se emplearán tanques verticales, donde el diámetro y la altura de los mismos son iguales. Se estimaron sus capacidades para la producción de una semana en el caso del aceite combustible y para un mes en el caso del ácido sulfúrico. Se estimó el volumen a almacenar con un factor de seguridad del 80 % sobre su capacidad de almacenamiento, para poder prevenir cualquier efecto interno de presión y prevenir rebalses. El tanque para aceite puede ser de hierro, el de ácido sulfúrico también. Cabe destacar que el de ácido sulfúrico por ser concentrado al 98 % v/v, no va a presentar problemas por

corrosión, entonces se escogió este material para minimizar costos. Las dimensiones de los tanques se encuentran en el cuadro 9.7. En la sección de apéndice C se muestra el cálculo de dichas dimensiones.

Cuadro 9.7. Dimensiones de los tanques de almacenamiento (Madrigal, 2015).

Tanque	Parámetro	Dimensión
Aceite sin agua libre	Volumen (m ³)	125
	Altura y Diámetro (m)	6,5
Aceite producto final	Volumen (m ³)	125
	Altura y Diámetro (m)	6,5
Ácido sulfúrico	Volumen (m ³)	125
	Altura y Diámetro (m)	6,5

Para la selección de la tubería se basó en las tuberías ANSI, ASA. Se escogió acero cédula 40. Mott (2006), presenta velocidades recomendadas para el trasiego de sustancias, en este caso se utilizó como valor de diseño 3 m/s. Se calculó el diámetro mínimo a partir del área y el flujo volumétrico. El diámetro interno para esta tubería es de 0,062 7 m. Dicho diámetro se ajusta bien al estándar 2 ½" Cédula 40. Por ende, esta va a ser la tubería requerida en el proceso que se está diseñando. Con base en la misma se determinaron las dimensiones de las bombas de desplazamiento positivo para trasegar el aceite entre equipos.

Por último, se tienen las bombas del proceso, las distancias entre equipos se establecieron de seis metros, lo anterior por cuestiones de seguridad y exigencia del Ministerio de Salud. Para el ácido se requiere una bomba más pequeña que para las zonas donde lo que se trasiega es aceite. Las bombas para el aceite, lodos y para el ácido deben ser de tipo desplazamiento positivo por su alta viscosidad. La adición de cal se hace manual, ya que esta es un sólido y su presentación es en sacos de 50 kg. Las bombas para separar el agua libre son centrifugas. Se requieren bombas centrifugas para el trasiego del agua libre y para el agua caliente en el intercambio calórico.

Se estableció como tiempo de operación para trasiego 30 minutos, ya que como se vio en el gráfico de Gantt del capítulo ocho se tiene dicho tiempo para la operación de trasiego entre cada etapa. Para ello se escogieron las peores condiciones, se aplicó un factor de eficiencia del 75 % en las bombas, lo anterior para no operarlas al 100 % y prevenir daños (Franklin Electric, 2015). De

modo se muestran en el cuadro 9.8 las potencias y capacidades de trasiego diseñadas para las bombas del proceso. En la sección de apéndice C se muestra el cálculo de las bombas.

Cuadro 9.8. Capacidades y potencias de las bombas para trasiego (Madrigal, 2015).

Fluido a trasegar	Tipo	Potencia (W)	Capacidad (m ³ /s)
Aceite	Desp. Positivo	20 000	0,009 46
Lodo	Desp. Positivo	2 983	0,001 58
Ácido Sulfúrico	Desp. Positivo	2 983	0,001 58
Agua decantada	Centrifuga	1 119	0,000 80
Agua Caliente	Centrifuga	3 729	0,003 75

De este modo se dan por diseñado y dimensionado el proceso para tratar el desecho, de modo que se obtenga un aceite combustible de uso apto para calderas. En resumen, el proceso es capaz de trabajar 25 000 litros al día de aceite sucio, obteniendo al final del proceso 20 993 litros de producto listo. Por otra parte, cabe destacar que dicha variabilidad siempre fue considerada a lo largo del proceso, manejando factores de seguridad altos y capacidades en los equipos con un ligero sobredimensionamiento, y todos los cálculos pueden consultarse en el apéndice C, referente a la muestra de cálculo.

10. ANÁLISIS ECONÓMICO.

El análisis económico se considera de suma importancia a la hora de diseñar un proceso, debido a que no sería útil contar con una metodología en donde se alcance el óptimo desde el punto de vista técnico y operativo, siendo éste no rentable. Para llevar a cabo el estudio de viabilidad del presente diseño se siguió la metodología expuesta en el capítulo 4 del libro *“Diseño de Plantas su Evaluación Económica para Ingenieros Químicos”* (Peters & Timmerhaus, 1991).

Para la operación adecuada de la planta es preciso contar con un ingeniero de proceso, encargado del funcionamiento adecuado de la planta, así como de responder a imprevistos y realizar las pruebas de calidad en el laboratorio destinado para tal fin. El mismo debe de tramitar compra de materia prima y estar a cargo de las órdenes de producción.

También se requiere de tres operarios pues es necesario contar con personal capacitado que pueda asistir al ingeniero en sus labores. Los operarios estarán encargados de labores como encendido de los equipos, control de los tiempos de residencia, mantenimiento y limpieza.

Se necesita un gerente general encargado de lo relativo a inversiones, toma de decisiones, aprobar compras y el posicionamiento del producto para su venta, mercadeo y trámites legales ya que éste funcionario va a ser la imagen de la empresa.

Además se requiere contratar los servicios profesionales de un contador para que asuma pagos de planillas de personal, pago de cargas sociales, además de lo relativo al cierre fiscal y al Ministerio de Hacienda.

Se contempla además un misceláneo encargado de la limpieza de la oficina y baños. Además, se requiere contratar los servicios guarda de seguridad las 24 horas, por ende son 3 personas más al día. También se requiere contratar una secretaria con funciones de atender al cliente y organizar la agenda del ingeniero y el gerente, así como tramitar todo el papeleo referente a la empresa desde su consumo en materia prima hasta el despacho del producto, ésta debe llevar a cabo un control de inventario junto con el ingeniero y el gerente general.

Según la legislación nacional, la empresa deberá pagar un 46,32% del salario base de cada funcionario correspondiente a cargas sociales. En el cuadro 10.1 se muestran los salarios con base a los datos emitidos por el Ministerio de Trabajo.

Cuadro 10.1. Salarios y cargas sociales mensuales de los empleados de la planta (Ministerio de Trabajo, 2015).

Puesto	Salario Mensual (\$)
1 Ingeniero	1 079
3 Operarios	1 661
1 Gerente	1 849
1 Contador	555
1 Secretaria	700
3 Guardas de Seguridad	1 800
1 Misceláneo	600
Cargas Sociales (46,32 % del salario base)	4 066
Total, en planilla mensual	12 310

Para iniciar con este análisis se requiere contar con la inversión total de capital, la cual está definida por la ecuación 10.1.

$$\text{Inversión Total de Capital} = \text{Inversión de Capital Fijo} + \text{Inversión de Capital de Trabajo} \quad (10.1)$$

Por otra parte, la inversión de Capital fijo está dada por la suma de los costos directos y los indirectos. En el cuadro 10.2 se muestra un resumen de la estimación del capital de trabajo. En la sección de anexos puede encontrar los precios del ácido sulfúrico al 98 %, diesel y óxido de calcio, las cuales son las materias primas del proyecto.

Cuadro 10.2. Estimación del capital de trabajo anual (Madrigal, 2015).

Rubro	Costo (\$)
Agua y Electricidad	32 000
Impuestos Municipales en Moín	883
Materia prima (Ácido sulfúrico, Diesel y Óxido de Calcio)	869 158
Salarios (Incluye Aguinaldo y Vacaciones)	160 030
Total Capital de Trabajo	1 062 071

En el cuadro 10.3 se resume la estimación de la inversión total de capital. En el apartado H de los anexos pueden consultarse las descripciones de las cotizaciones realizadas para el análisis económico. Por ejemplo, algunos datos como la instalación de tubería y equipo eléctrico, se hicieron mediante una cotización directa con la empresa “Corporación Industrial Río Verde del Caribe S.A” y no se consideró por ende el porcentaje que el autor propone a partir del costo de los equipos. Cierta información que no pudo ser consultada con ningún ofertante se obtuvo mediante los porcentajes propuestos.

Cuadro 10.3. Estimación de la Inversión total del capital (Madrigal, 2015).

Rubros	Precio Total (\$)
Costos Directos:	
Equipos, instalación, instrumentación, tuberías, instalación equipo eléctrico. Incluye impuestos.	285 705
Costos de embarque a Costa Rica	10 000
Instalación y Mano de obra	14 000
Terreno, cisternas y edificación	60 000
Mantenimiento	27 815
Costos Indirectos:	
Ingeniería (planos, permisos...)	22 596
Honorarios	15 712
Eventuales	10 141
Inversión de Capital Fijo	398 505
Capital de Trabajo Anual	1 062 071
Inversión Total de Capital	1 460 576

En cuanto a la venta del producto y análisis de mercado, se va a suponer que se logra colocar todo el producto en el mercado, ya que es un producto que puede llegar a sustituir el Búnker C, partiendo del hecho que se vende a un precio muy inferior por no poseer las mismas características, principalmente por limpieza y por el modo de funcionamiento que requiere, la empresa que lo obtenga estaría incurriendo en un ahorro.

Se hizo la consulta a empresas de la zona limonense como la “Laminadora del Caribe”, “Vicesa” y “Mundimar S.A.”; a todas les llamó la atención y piensan que sería una opción a considerar. El precio del litro de dicho aceite combustible se propuso en 150 colones, equivalente a \$ 0,276. Se

propuso un precio por debajo del búnker C. Los ingresos del proyecto se estimaron con dicho precio del aceite combustible. En el cuadro 10.4 se estiman los ingresos que tendría dicho producto si se comercializa.

Cuadro 10.4. Estimación de los ingresos anuales del proyecto (Madrigal, 2015)

Aceite producido (L)	Precio (\$/ litro)	Ingresos (\$)
6 020 200	0,276	1 661 299

Para el análisis económico, respecto a los flujos de caja y demás detalles, se eligió realizar una depreciación lineal, con una vida útil de 20 años para todos los equipos y para un periodo de largo plazo, en este caso 10 años.

Para llevar a cabo la planta procesadora, se debe recurrir a un préstamo. En este caso se utilizó una herramienta en línea del Banco de Costa Rica, en la cual se ingresa el monto en dólares que se desea solicitar, luego la calculadora da un promedio de lo que se debe pagar anualmente para cubrir el préstamo. Además, en el programa anteriormente mencionado, se colocan los años de plazo a los que se solicita el dinero. Esta interfase se puede observar en el anexo D, figura D.1.

El valor actual neto o VAN de una inversión es el valor actualizado de todos los rendimientos esperados, es decir consiste en una comparación entre la inversión inicial realizada y los flujos a futuro expresados como moneda actual (Brun, Elvira, & Puig, 2008). La fórmula para calcular el VAN es la siguiente:

$$VAN = -A + \frac{CF_1}{(1+k)^1} + \frac{CF_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+k)^n} \quad (10.2)$$

Donde :

- A: inversión inicial, \$
- CF_i: flujo de caja para el año i, \$
- n: número del año en cuestión, año
- k: tasa de actualización de flujos futuros, adim

Cuando el VAN obtenido es positivo quiere decir que el proyecto es rentable y por lo tanto la inversión es aconsejable, sin embargo, si el VAN es negativo quiere decir que el proyecto no es rentable y por lo tanto no es aconsejable invertir en él. Se empleó un valor de $k=0,1$.

Por otro lado, está la tasa interna de retorno TIR es otro indicador importante de la rentabilidad del proyecto, aunque menos usado que el VAN para este propósito. El TIR corresponde a la tasa de actualización que debería utilizarse para que el VAN sea cero (Brun, Elvira, & Puig, 2008).

Cuando el VAN es cero esto quiere decir que da lo mismo invertir el dinero en el proyecto o en un banco, pues la ganancia va a ser la misma, de forma que conociendo la tasa de actualización para cuando el VAN es cero permite saber para cuales tasas de actualización la inversión resultarán rentables o no.

Entre mayor sea el TIR más rentable resulta el proyecto pues implica que la tasa de actualización obtenida es mayor a la que puede ofrecer el banco y por tanto esto quiere decir que resulta más rentable continuar con la inversión.

Se procedió a calcular el VAN y el TIR con ayuda de una hoja de cálculo, en el cuadro 10.6 se muestran los flujos de caja de cada año durante diez años, junto con los valores de TIR y VAN calculados en el estudio. Para el año cero no se contemplaron ingresos por razones de seguridad ya que únicamente es inversión. Además, si se observa se contempló toda la inversión en el año cero. Mientras que para los restantes años si se contemplan los ingresos calculados.

Cuadro 10.5. Flujo de caja para los primeros 5 años (Madrigal, 2015).

Año	0	1	2	3	4
Inversión	400 000	/	/	/	/
Ingresos	0	1 600 000	1 600 000	1 600 000	1 600 000
Préstamo	-92 000	-92 000	-92 000	-92 000	-92 000
Costos operación	-1 100 000	-1 100 000	-1 100 000	-1 100 000	-1 100 000
Costo depreciación	-40 000	-40 000	-40 000	-40 000	-40 000
Utilidad Bruta	-1 232 000	368 000	368 000	368 000	368 000
Impuestos	-369 600	-110 400	-110 400	-110 400	-110 400
Utilidad Neta	-1 601 600	257 600	257 600	257 600	257 600
Depreciación	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000
Flujo de caja	-1 561 600	297 600	297 600	297 600	297 600

Continuación Cuadro 10.5. Flujo de caja para los siguientes 5 años (Madrigal, 2015).

Año	5	6	7	8	9
Ingresos	1 600 000	1 600 000	1 600 000	1 600 000	1 600 000
Préstamo	-92 000	-92 000	-92 000	-92 000	-92 000
Costos operación	-1 100 000	-1 100 000	-1 100 000	-1 100 000	-1 100 000
Costo depreciación	-40 000	-40 000	-40 000	-40 000	-40 000
Utilidad Bruta	368 000	368 000	368 000	368 000	368 000
Impuestos	-110 400	-110 400	-110 400	-110 400	-110 400
Utilidad Neta	257 600	257 600	257 600	257 600	257 600
Depreciación	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000
Flujo de caja	297 600	297 600	297 600	297 600	297 600
VAN (\$)	1 100 000				
TIR (%)	21 %				

*Cualquier variación respecto a las estimaciones anteriores, se debe a que se reportan los datos redondeados a la unidad mayor o menor según el caso.

Se obtuvo un valor para el VAN para el proyecto es de \$ 1 074 275. Este VAN es positivo y además tiene una magnitud bastante grande lo que señala que la inversión a realizar es altamente rentable y se puede esperar obtener bastantes beneficios de la inversión en este proyecto en comparación a si dicho dinero se depositara en un banco con una tasa de interés del 10% todo en moneda actual.

Para el caso del presente proyecto el cálculo del TIR es de 21% lo que respalda el resultado obtenido con el VAN de que el proyecto es altamente rentable, esto porque ningún banco utilizará una tasa tan alta sobre los fondos invertidos, lo que vuelve al proyecto en una opción más viable y atractiva.

Se concluye por ende que a al tener un TIR del 21% y un VAN de \$ 1 074 275, el proyecto diseñado resulta rentable y viable de llevar a cabo. Por lo tanto desde el punto de económico se dice que el proyecto es viable. Otros análisis que puede hacerse para estudiar mejor dicha viabilidad es proponer escenarios, donde se sube o baja el precio del ácido, el precio del producto, la adquisición de materia prima, entre otras.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

11.1. Conclusiones:

Se obtuvo el diseño de un proceso para tratar el aceite usado con reacción química en donde se produce un combustible con las condiciones mínimas para ser empleado en una caldera industrial.

Se concluye que el aceite usado es un producto que se genera con mucha frecuencia el cual debe tratarse para evitar problemas por contaminación a nivel mundial, ya que se genera en cantidades grandes.

Dentro de las posibilidades de aprovechamiento del aceite residual, la técnicamente y más empleada es su aprovechamiento como un combustible, a partir de una matriz de selección se concluyó que tanto ambiental, como económica y técnicamente la tecnología que mejor se acomoda para el proceso es un tratamiento con ácido sulfúrico.

Se muestrearon por un lapso de un mes diferentes barcos para contemplar la alta variabilidad de la materia prima y se caracterizó la misma, específicamente el BSW y el contenido de metales pesados, teniendo como resultado un $(20,4 \pm 4,6)$ % de agua y sedimento, y un contenido mínimo de 6 939 ppm de metales pesados en el aceite.

Se estimó el volumen de producción a partir de datos históricos de la empresa ACASE S.A. y se concluyó que la planta a diseñar debe tener una capacidad de procesar 600 000 litros de aceite sucio mensuales.

Se estudió la operación de sedimentación gravitacional para separar el agua libre, concluyéndose que el tiempo de operación debe ser de 1 hora para separar el agua libre, dejando al aceite con un BSW de 2,00 % v/v.

Se estudió la reacción de limpieza con ácido sulfúrico y se llegó a la conclusión que el tiempo óptimo de limpieza es de una hora por seguridad. Se tuvo como variable de respuesta el BSW en el aceite una vez centrifugado.

Se estudió la operación de sedimentación del ácido sulfúrico posterior a la reacción de limpieza, concluyéndose que con el tiempo de operación debe ser de 15 min, obteniendo en el aceite una acidez 85,50 mgKOH/g.

Se estudió la operación de neutralización del aceite tratado y se concluyó que se requiere adicionar un 3,00 %m/m de óxido de cal respecto al aceite alimentado para dejar el aceite con una acidez 32,50 mgKOH/g, valor que si es permitido en el producto.

Se estudió la centrifugación como operación final para separar restos de lodos y se concluyó que con una RCF de 800 se logra dejar el aceite con un BSW inferior a 0,05 %v/v, lo cual lo deja en condiciones aptas para su uso como combustible.

Se dimensionaron los equipos, a partir de balance de materia, energía, relaciones de diseño, para luego cotizar estos equipos y analizar su viabilidad económica. El costo de inversión es de \$ 398 505.

Se concluye que el proceso es viable en caso de llevarse a cabo, pese a tratarse de un diseño preliminar se obtuvo un TIR del 21 % y un VAN positivo alto de \$1 074 275. Lo cual son indicativos económicos de que es mejor invertir en el proceso a dejar la plata en un banco.

11.2. Recomendaciones:

Se recomienda a futuro llevar a cabo una investigación para la optimización del proceso productivo.

Se recomienda evaluar en planta los tiempos de operación de la reacción química, sedimentación de lodo ácido y el agua libre, debido a que en el presente proyecto de acuerdo a lo visto en el laboratorio se aportó un factor de seguridad alto, lo cual en la realidad podría verse disminuido y disminuir tiempos de operación. O bien reajustar los tiempos. Esto se logra mediante la toma de muestras en los equipos a distintos tiempos de operación para corroborar los resultados actuales o bien reajustar los mismos.

Se recomienda realizar el diseño de la planta procesadora de aguas residuales.

Se recomienda hacer un análisis económico más a fondo, donde se analice la sensibilidad y riesgo para tener un panorama más grande de la viabilidad del proyecto, en donde se analicen escenarios, como la variación del ácido sulfúrico, entre otros.

Se recomienda plantearse la idea de aprovechar el lodo ácido como una planta en paralelo donde se fabrique una pintura y así tener otro ingreso.

12. NOMENCLATURA

Letras en latín:

μ	Viscosidad	Pa s
η	Eficiencia	Adimensional
P	Densidad	kg/m ³

Letras minúsculas:

F	Factor de Fanning	Adimensional
G	Gravedad	m ² /s
H	Coefficiente transferencia de calor	W/(m ² °C)
Hf	Pérdidas por fricción	M
N	Velocidad centrífuga	RPM
Rcf	Fuerza centrífuga relativa	RCF
T	Tiempo	S
U	Velocidad	m/s
W	Flujo másico	kg/s
X	Fracción masa	Adimensional

Letras mayúsculas:

A	Área	m ²
B	Espaciado deflectores	M
BSW	Lodo y sedimento	% V/V
C	Capacidad Calorífica	kJ/kg°C
C'	Espacio entre tubos	M
D	Diámetro	M
E	Altura del agitador	M
F	Flujo másico	kg/s
Ft	Corrección de temperaturas	Adimensional
G	Masa velocidad	kg/ms
H	Altura	M
J	Deflectores	M
L	Largo	M
MLDT	Promedio logarítmico medio	°C
N	Número	Adimensional
P	Presión	KPa
PC	Poder calorífico	kJ/kg
Pt	Pitch	M

Q	Calor	kJ/s
	Flujo Volumétrico	m ³ /s
Rd	Factor de ensuciamiento	Adimensional
T	Temperatura	°C
U	Coefficiente transferencia de calor	W/m ² °C
W	Potencia	Kw

Subíndices:

A	Agitador
Fr	Froude
Re	Reynolds
S	Coraza
T	Tubo
W	Pared

13. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, G., & Iza, A. (2009). *Derecho Ambiental en Centro América*. Moravia, Costa Rica: Union Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales: Diseño Editorial S.A.
- Alvarado, A., & Barquero, M. (2008). *Análisis Químico Instrumental: Manual de Prácticas de Laboratorio*. San José: Editorial UCR.
- ASTM. (2011). Standar test method for base number of petroleum products by potentiometric acid perchloric titration. *Designation: D2896*. Conshohocken, United States: ASTM International.
- ASTM. (2013). Standar Test Method for Water and Fuel Oils by the Centrifugate Method (Laboratory Procedure). *Designation: D1796. ASTM International, 1-7*.
- ASTM. (2014). Standart Especification for Fuel Oil. *Designation: D396-14*. United States: ASTM International.
- Bailey, A. (1984). *Aceites y grasas industriales*. Barcelona: Reverté.
- Beasley. (2006). *Practical Advances in Petroleum Processing*. Estados Unidos: Springer Science.
- Callister, W., & Rethwisch, D. (2009). *Material Science and Engineering Introduction* (8° Edición ed.). United States: Wiley.
- CAR/PL. (Febrero de 2001). Posibilidades de Reciclaje y de Aprovechamiento de los Aceites Usados. *Plan de Acción para el Mediterráneo*. Barcelona, España: cema-sa.
- Chávez, C., & Navarrete, J. (2012). *Análisis de aceite de los motores diesel de un buque pesquero para mantenimiento predictivo*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

- CONAMA. (2008). *Guía técnica para Aceites Usados del Sector Transporte*. Santiago, Chile: Proyecto Respel.
- COREL y Cía S.A. (2012). *Filtros prensa con placas plásticas*. México: Durapol.
- CTR Scientific. (2000). *CTR Scientific*. Recuperado el 15 de 05 de 2015, de <http://www.uacj.mx/IIT/CICTA/Documents/Acidos/Acido%20Sulf%C3%BArico.pdf>
- Delgado, E., & Parra, J. (2007). Combustibles Alternativos a partir de Aceites Usados con tratamientos de limpieza. *AVANCES: Investigación en Ingeniería*, 110 - 115.
- Dondé, M. (2005). *Transporte de Momentum y Calor. Teoría y Aplicaciones a la Ingeniería de Proceso*. Yucatán: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.
- Emam, E., & Shoaib, A. (15 de July de 2013). Re-refining of used oil, I-By solvent extraction and Vacuum distillation followed by hidrotreating. *Petroleum and Coal*, 1-9.
- Engel, T., Reid, P., & Hehre, W. (2006). *Química Física*. Madrid: Pearson, Addison Wesley.
- Espuglas, S., & Chamarro, M. (2005). *Fundamentos de Transmisión de Calor*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Everest Blower Systems. (2007). *Waste oil re-refining*. India: Mayapuri Industrial Area.
- Eximport S.A. (2013). *Comparación de las propiedades del Búnker C y un aceite combustible*. San José: Eximport S.A.
- Fingas, M. (2012). Types of Oil and Their Properties. En M. Fingas, *The Basics of Oil Spill Cleanup* (págs. 33-42). Mexico: CRC Press .
- García, N. (2011). *Prefactibilidad técnica y económica de una planta para la producción de aceite base para la fabricación de aceites lubricantes a partir de fracción de gasóleos pesados de vacío, en el plantel de Moín de la Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE S.A.)*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Gómez, D., & Gómez, M. (2013). *Evaluación de Impacto Ambiental*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.

- Harris, D. (2007). *Análisis Químico Cuantitativo*. Madrid, España: Reverté.
- IMN. (2013). *Instituto Meteorológico Nacional: Temperatura media de Limón*. Recuperado el 09 de 04 de 2015, de Temperatura Máxima (°C)
- Kern, D. (2012). *Procesos de Transferencia de Calor*. Mexico: Grupo Editorial Patria.
- Llorca, R., & Bautista, I. (2006). *Prácticas de Atmósfera, Suelo y Agua*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Lynch, T. (2008). *Process Chemistry of Lubricant base Stocks*. Ontario, Canada: CRC Press.
- Mang. (2007). *Lubricants and Lubrication* (Vol. 2° Edición). Alemania: Wiley-VCH.
- Marfisi, S., & Salager, J. (2006). *Deshidratación de Crudo: Principios y Tecnología*. Los Andes: Escuela de Ingeniería Química: Universidad los Andes. Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Mexico: McGraw-Hill.
- Ministerio de Salud; Presidencia de la República. (2004). DE-31837 Reglamento de requisitos, condiciones y controles para la utilización de combustibles alternos en los hornos cementeros. *La Gaceta*, 1-9.
- Montes, M. (2003). *Re-Refinado de Aceites Usados*. Vigo: Universidad de Vigo.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Mexico: Editoria Pearson.
- Moya, L., & Botamino, I. (2010). *Desde el aceite lubricante usado hasta su puesta en el mercado tras su regeneración*. Sevilla: Escuela de Organización Industrial.
- Nuñez, M. (25 de 04 de 2014). *Operaciones Unitarias I, Universidad de Sonora*. Obtenido de <http://operaciones-unitarias-1.wikispaces.com/Tipos+de+Destilacion>
- Patiño, P. (2005). *Tratamiento de aguas producto de la perforación de pozos petroleros*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

- Peng, E. (19 de Abril de 2014). *alibaba*. Obtenido de <http://spanish.alibaba.com/product-gs/three-phase-sorvall-centrifuge-dry-400-735109161.html?s=p>
- Pérez, J. (2011). *Descripción de los efectos del biodiesel sobre las propiedades fisicoquímicas de los lubricantes*. Barcelona: Universidad de Oriente.
- Perry, R., & Green, D. (1999). *Perry's Chemical Engineering Handbook*. New York: Mc-Graw Hill.
- Peters, M., & Timmerhaus, K. (1991). *Diseño de Plantas su Evaluación Económica para Ingenieros Químicos*. Colorado, Estados Unidos: Mc Graw Hill Chemical Engineering Series.
- PNUMA. (05 de Mayo de 1992). Convenio de Basilea. *Sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación*. Argentina: PNUMA.
- PNUMA. (05 de Mayo de 2009). Convenio de Basilea. *Sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación*. Suiza: PNUMA.
- Pöler, J., Mödler, M., Brunhke, D., & Hindenberg, H. (16 de 01 de 2005). *Patente nº ES 2 222 051 T3*. España.
- Presidencia de la República; Ministro de Ambiente y Energía; Ministra de Salud. (19 de Marzo de 2007). Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales. *Decreto N° 33601- MINAE-S-, 1-56*. San José, San José, Costa Rica: La Gaceta.
- PROARCA. (2004). *Reporte Nacional de Manejo de Residuos en Guatemala*. Guatemala: Centro guatemalteco de producción más limpia.
- Ramírez, E., & Cajigas, M. (2004). *Proyectos de Inversión Competitivos: Formulación y Evaluación de Proyectos de Inversión con Visión Emprendedora Estratégica*. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Ramírez, J. (1994). *Recuperación de aceites lubricantes para automotores a partir de aceites usados y desechados, mediante procesos Físico-Químicos*. Antioquía: Universidad de Antioquía.
- RECOPE. (20 de 06 de 2011). *Manual de Productos*. Obtenido de <https://www.recope.go.cr/manual-de-productos/>

SAE Internatioanl. (18 de 10 de 2015). *Standards for lubricants*. Obtenido de:
<https://www.sae.org/>

Saldivia, F. (2013). *Aplicación de mantenimiento predictivo. Caso de estudio: Análisis de aceite usado en motor de combustión interna*. Cancún, Mexico: Latin American and Caribbena Conference for Engineering and Technologu.

Spirax Sarco. (2015). *Saturated water line - Steam table*. Recuperado el 05 de 04 de 2015, de
<http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Tables/saturated-water.aspx>

Storch, J., & García, T. (2008). *Seguridad Industrial en Plantas Químicas y Energéticas*. España: Edicions Díaz de Santos S.A.

Thermal Combustión. (2015). *Thermal Combustion*. Recuperado el 02 de 07 de 2015, de
<http://www.thermalcombustion.com/>

Tormos, B. (2005). *Diagnóstico de Motores Diesel mediante el Análisis del Aceite Usado*, Editorial Reverté. Recuperado el 09 de 09 de 2015, de
<http://es.scribd.com/doc/213448265/ANALISIS-DE-ACEITES-EN-MOTORES-DIESEL#scribd>

UNAD. (04 de 04 de 2015). *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*. Obtenido de
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358040/Contenido_en_linea_Diseño_de_Plantas_Potabilizadoras/leccin_38_sedimentadores_de_flujo_horizontal.html

Universidad de Cádiz. (20 de octubre de 2012). *Filtración: operaciones de separación mecánicas*. Obtenido de <http://fiqxfalapa.files.wordpress.com/2011/11/filtracic3b3n-1.pptx>

Verdoy, P., Mahiques, J., Pellicer, S., & Prades, R. (2006). *Manual de Control Estadístico de la Calidad: Teoría y Aplicaciones*. Castellón, España: Publicaciones de la Universidad Jaume I.

14. APÉNDICES

A. Datos Experimentales.

Cuadro A.1. Contenido de agua y sedimento en el aceite usado de los barcos que arriban a Moín (Propio, 2015).

Muestra	Agua y Sedimento (% v/v)
1	20,0
2	17,5
3	25,0
4	25,0
5	20,0
6	17,5
7	17,5
Promedio	20,4

Cuadro A.2. Tiempo de separación por diferencia de densidad en el aceite residual (Madrigal, 2015).

Tiempo de Sedimentación (h)	BSW en el aceite (%V/V)
1,00	2,00 %
2,00	1,90 %

Cuadro A.3. Datos de tiempo y BSW en el aceite tratado para estimar la cinética de reacción (Madrigal, 2015).

Tiempo de Reacción (min)	BSW en el aceite (%V/V)
0	2,00
5	2,00
10	1,30
15	1,35
20	1,25
25	1,00
30	0,75
35	0,05
40	0,05
50	0,05
60	0,05

Cuadro A.4. BSW obtenido en los aceites posterior a la centrifugación para distintos porcentajes de ácido sulfúrico empleado durante la reacción (Madrugal, 2015).

% v/v de H₂SO₄	% BSW en el aceite centrifugado
5,00	0,10
7,00	0,05
10,00	0,05
15,00	0,05

Cuadro A.5. Tiempos de separación del agua-libre expresados con el BSW del aceite usado (Madrugal, 2015).

Tiempo de Sedimentación en Probeta de 100 mL (min)	BSW en el Aceite (% v/v)
0	25,00
15	7,50
30	5,00
45	2,00
60	2,00
90	1,80
120	1,60

Cuadro A.6. Tiempos de separación del lodo ácido expresados con el BSW del aceite usado (Madrugal, 2015).

Tiempo de Sedimentación en Probeta de 100 mL (min)	BSW en el Aceite (% v/v)
0	10,00
5	5,00
10	0,50
15	0,50
20	0,50
30	0,25
60	0,20

Cuadro A.7. Acidez del aceite al agregarle KOH en diferentes cantidades (Madrigal, 2015).

Cantidad de Cal agregada (%m/m)	Acidez antes de adicionar Cal (mgKOH/g)	Acidez después de adicionar Cal (mgKOH/g)
1,00	85,50	77,25
2,00	85,50	57,25
3,00	85,50	32,50
4,00	85,50	31,50
5,00	85,50	30,50

Cuadro A.8. Acidez del aceite a distintos tiempos de neutralización para 3,00 %m/m de cal (Madrigal, 2015).

Tiempo (min)	Acidez (mgKOH/g)
0	85,50
15	31,50
30	31,50
45	31,50

B. Datos Intermedios.

A continuación se resumen las propiedades de interés de las sustancias empleadas en el diseño, algunas son estimadas, otras son obtenidas de referencias teóricas y otras de análisis de laboratorio. Posteriormente los resúmenes de cálculos obtenidos para el presente estudio.

Cuadro B.1. Propiedades físico-químicas de las sustancias empleadas y las producidas en el proceso de obtención de un combustible a partir del aceite residual (Madrigal, 2015).

Sustancia	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (Pa s)	Capacidad calorífica (J/kg K)
Aceite residual sin ningún tratamiento (Corriente 1)	939	0,163	2 457
Agua residual separada en el decantador (Corriente 2)	997	0,001	4 186
Aceite residual con 2 % de BSW frío (Corriente 3)	954	0,304	2 025
Aceite residual con 2 % de BSW caliente (Corriente 4)	924	0,204	2 025
Ácido sulfúrico al 98 % (Corriente 5)	1 840	0,025	/
Productos de la reacción (Corriente 6)	1 006	0,245	2 001
Lodo ácido separado en la centrifugadora (Corriente 7)	1 840	0,025	/
Aceite combustible con trazas ácidas (Corriente 8)	924	0,204	2 025
Aceite combustible con óxido de calcio (Corriente 9)	963	/	/
Aceite combustible listo para emplearse (Corriente 10)	924	0,204	2 025
Óxido de Calcio (Corriente 11)	2 211	/	/

Cuadro B.2. Flujos máscos de las corrientes del proceso (Madrigal, 2015).

Corriente	Flujo Máscico (kg/s)	Composición (Adimensional)
F1	6,520 8	$X_{BSW} = 0,214 0$ $X_{Aceite} = 0,796 0$
F2	1,250 3	$X_{BSW} = 1,000 0$
F3	5,270 5	$X_{BSW} = 0,020 0$ $X_{Aceite} = 0,980 0$
F4	5,270 5	$X_{BSW} = 0,020 0$ $X_{Aceite} = 0,980 0$
F5	0,527 1	$X_{H2SO4} = 1,000 0$
F6	5,797 6	$X_{BSW \text{ ÁCIDO}} = 0,0900$ $X_{Aceite} = 0,910 0$
F7	0,643 1	$X_{BSW \text{ ÁCIDO}} = 1,000 0$
F8	5,154 5	$X_{BSW} = 0,000 5$ $X_{Aceite} = 0,999 5$
F9	5,309 1	$X_{BSW} = 0,000 5$ $X_{Aceite} = 0,999 5$
F10	6,520 8	$X_{Aceite} = 1,000 0$
F11	0,154 6	$X_{CaO} = 1,000 0$
F12	3,000 0	$X_{H2O} = 1,000 0$
F13	3,000 0	$X_{H2O} = 1,000 0$

Cuadro B.3. Dimensiones del intercambiador de calor.

Dimensión	Valor
D_E , Diámetro equivalente coraza (m)	0,590 1
D_{E_t} , Diámetro equivalente tubo (m)	0,014 8
A, Área transferencia calor (m ²)	116,34
D_i , Diámetro interno coraza (m)	0,590 1
Número de pasos, N+1 (adimensional)	2,000 0
L, Longitud intercambiador (m)	6,000 0
F_T , Factor de ensuciamiento (m ² °C/W)	0,825 0
N_T , Número de tubos (adimensional)	324,00
B, Espaciado entre deflectores (m)	0,295 0
C', Claro (m)	0,006 4
P_T , Distancia entre centro de los tubos (m)	0,025 4
D_{ext} , Diámetro externo tubos (m)	0,019 0
T_1 , Temperatura entrada agua (°C)	80,00
T_2 , Temperatura salida agua (°C)	50,00
t_1 , Temperatura entrada aceite (°C)	25,90
t_2 , Temperatura salida aceite (°C)	50,00

Cuadro B.4. Flujos de caja para los primeros 5 años (Madrigal, 2015).

Año	0	1	2	3	4	5
Inversión	-558 244	/	/	/	/	/
Ingresos		2 514 705	2 514 705	2 514 705	2 514 705	2 514 705
Préstamo		-91 920	-91 920	-91 920	-91 920	-91 920
Costos operación		-2 242 647	-2 242 647	-2 242 647	-2 242 647	-2 242 647
Costo depreciación		-55 824	-55 824	-55 824	-55 824	-55 824
Utilidad Bruta		124 314	124 314	124 314	124 314	124 314
Impuestos		-37 294	-37 294	-37 294	-37 294	-37 294
Utilidad Neta		87 019	87 019	87 019	87 019	87 019
Depreciación		55 824	55 824	55 824	55 824	55 824
Flujo de caja	-558 244	142 844	142 844	142 844	142 844	142 844

Cuadro B.5. Flujos de caja para los segundos 5 años (Madrigal, 2015).

Año	6	7	8	9	10
Inversión	/	/	/	/	/
Ingresos	2 514 706	2 514 706	2 514 706	2 514 706	2 514 706
Préstamo	-91 920	-91 920	-91 920	-91 920	-91 920
Costos operación	-2 242647	-2 242 647	-2 242 647	-2 242647	-2 242 647
Costo depreciación	-55 824	-55 824	-55 824	-55 824	-55 824
Utilidad Bruta	124 314	124 314	124 314	124 314	124 314
Impuestos	-37 294	-37 294	-37294	-37 294	-37 294
Utilidad Neta	87 020	87 020	87 020	87 020	87 020
Depreciación	55 824	55 824	55 824	55 824	55 824
Flujo de caja	142 844	142 844	142 844	142 844	142 844

C. Muestra de Cálculos.

C.1. Cálculo de flujo másico de la Corriente 1.

Para este flujo se tomó el resultado de la estimación del volumen de producción Fila 12, Columna 2 del cuadro 6.1. Y se convirtió a kg/s de acuerdo a un tiempo de trasiego deseado de 30 minutos y a dos tandas al día y con la ayuda de dos bombas. Tomando la densidad del aceite sucio del cuadro B.1, fila 2 y columna 2.

$$F1 = 25\,000 \frac{L}{día} * \frac{1\,día}{2\,tanda} * \frac{1\,tanda * 1\,min}{30\,min} * \frac{1\,m^3}{1000\,L} * 939 \frac{kg}{m^3} \quad (C.1)$$

$$F1 = 6,520\,8\,kg/s.$$

C.2. Cálculo de las propiedades de las sustancias del cuadro B.1.

Las sustancias como ácido sulfúrico, óxido de calcio, agua y aceite listo, se tomaron directamente de referencias o fichas técnicas. Las zonas donde hay mezcla, por ejemplo el aceite residual, que contiene un 20,4 % de BSW y un 79,6 % de aceite, lo que se hace es promediar su propiedad a partir de las conocidas, se muestra a continuación el cálculo realizado para la densidad del aceite residual, donde se estimó para el BSW las propiedades del agua, tomadas de la referencia "Vaxa-Software", mientras que para el aceite los resultados del laboratorio Eximport S.A. del producto obtenido. Cabe destacar que las demás sustancias y datos se calculan de manera análoga, respetando la composición y las correspondientes propiedades. El dato calculado se encuentra en el cuadro B.1. fila 2 y columna 2, mientras que los que se sustituyen en la ecuación C.2 están ubicados en el mismo, pero en la fila 9 y columna 2; y en la fila 3 y columna 3 respectivamente.

$$\rho_{Aceite\ Sucio} = x_{Aceite} \rho_{Aceite} + x_{BSW} \rho_{BSW} \quad (C.2)$$

$$\rho_{Aceite\ Sucio} = 0,796 * 924 + 0,204 * 997$$

$$\rho_{\text{Aceite Sucio}} = 939 \text{ kg/m}^3$$

C.3. Cálculo del diámetro de tubería.

Para el cálculo del diámetro de tubería se tiene como recomendación manejar una velocidad de flujo de 3 m/s. El flujo másico obtenido en el resultado del cálculo C.1 a la hora de convertirlo a flujo volumétrico con la densidad obtenida en el cálculo C.2 del Mott 6 ta Edición se obtuvo una velocidad de flujo recomendada. Con esta y el flujo volumétrico se estima el Diámetro interno para seleccionar la que mejor se ajuste a las necesidades. Se resuelve la ecuación C.3 y con esta la C.4.

$$A = \frac{Q}{u} \quad (\text{C.3})$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \quad (\text{C.4})$$

Sustituyendo:

$$A = \frac{6,94 \times 10^{-3}}{3} = 0,0021 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0,0021}{\pi}}$$

$$D = 0,054 \text{ 3 m.}$$

Dichas dimensiones se aproximan según las tuberías ANSI a la de $2\frac{1}{2}$ " cédula 40. Por ende se define el diámetro con esta.

$$D_1 = 0,062 \text{ 7 m}$$

C.4. Cálculo de los flujos másicos de las corrientes 2 y 3.

Se realizó un balance de masa para el BSW y uno global tomando como sistema el sedimentador. Para ello se tomaron las fracciones del cuadro B.2 tomadas de la columna 3, Filas 2, 3 y 4. Así como el resultado del cálculo C1.

Balance de BSW:

$$X_{BSW} F1 = X_{BSW} F2 + X_{BSW} F3 \quad (C.5)$$

Balance Global en el sedimentador:

$$F1 = F2 + F3 \quad (C.6)$$

Sustituyendo en ambas ecuaciones, queda el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,204 * 6,5208 = 0,98 * F2 + 0,02 * F3 \\ 6,5208 = F2 + F3 \end{array} \right.$$

Resolviendo el sistema se obtiene:

$$F2 = 1,2503 \text{ kg/s}$$

$$F3 = 5,2705 \text{ kg/s}$$

C.5. Cálculo del flujo másico de la corriente 4 y 5.

Se recomienda por la literatura y lo obtenido en el laboratorio según el resultado del cuadro A.4 en un 10 % V/V respecto al aceite que se alimenta. Convirtiendo el flujo másico a volumétrico, aplicando el factor de 10 % y devolviendo a flujo másico se obtiene la corriente F5. Además la Corriente F4 y F3 son iguales solo que una a 50 °C y la otra a temperatura ambiental.

$$F3 = F4 \quad (C.7)$$

$$Q5 = 0,10 * Q4 \quad (C.8)$$

Sustituyendo los valores de las densidades del cuadro C.1, filas 4 y 5 de la columna 2, así como el resultado del cálculo C.2 se obtiene:

$$Q4 = 5,2705 * \frac{1}{924} = 0,0057 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q5 = 0,10 * 0,0057 = 0,0006 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$F5 = Q5 * \rho_5 \quad (C.9)$$

$$F5 = 0,0006 * 924$$

$$F5 = 0,5271 \text{ kg/s}$$

$$F3 = 5,2705 \text{ kg/s}$$

C.6. Cálculo del volumen de reactor.

El volumen en un reactor Batch de condiciones estándar, será rígido, con un factor de seguridad para evitar rebalses de un 80 % de su capacidad. Se estima con el volumen por tanda cuadro 6.1, fila 13 y columna 2 por día, dividido entre cuatro, ya que son dos reactores y dos tandas al día. El ácido corresponde al 10 % de dicho volumen.

$$V = \frac{V_{Tanda\ Aceite} + V_{Tanda\ Acido}}{F_{Seg.}} \quad (C.10)$$

$$V = \frac{5,00 + 0,50}{0,80} = 6,88 \text{ m}^3$$

Se redondea de la siguiente manera por facilidad de obtención.

$$V = 7,00 \text{ m}^3$$

C.7. Estimación del tiempo de reacción.

A partir del comportamiento de limpieza observado en la figura 8.2 a los 40 min se empiezan a obtener valores de BSW iguales, por ende por seguridad se estimó dejar la reacción con un tiempo de reacción de 1 hora, para tener un factor de seguridad que permita garantizar la limpieza del aceite residual. En caso de llevarse a cabo en la realidad se aconseja tomar muestras directamente del reactor y re-evaluar éste parámetro.

$$t = 1,00 \text{ h}$$

C.8. Cálculo de las dimensiones del tanque de reacción.

Las dimensiones del tanque se obtienen a partir de las ecuaciones del Mott (2006) para tanques estándar agitados. Como la altura y el diámetro son iguales, se obtiene la siguiente ecuación.

$$D = \sqrt[3]{\frac{4*V}{\pi}} \quad (\text{C.11})$$

Despejado y resolviendo al sustituir el resultado obtenido en el cálculo C.6.

$$D = \sqrt[3]{\frac{4*7}{\pi}}$$

$$D = 2,00 \text{ m}$$

A continuación se muestran las demás dimensiones calculadas, se toman los resultados de las mismas dimensiones obtenidas en el presente cálculo C.8. Las mismas son relaciones de diseño para tanques agitados estándar, una vez obtenido el diámetro del tanque se pueden obtener las demás.

$$H = D \quad (\text{C.12})$$

$$H = 2,00 \text{ m}$$

$$\frac{Da}{D} = \frac{1}{3} \quad (C.13)$$

$$Da = \frac{1}{3} * 2,00$$

$$Da = 0,70 \text{ m}$$

$$\frac{J}{D} = \frac{1}{12} \quad (C.14)$$

$$J = \frac{1}{12} * 2,00$$

$$J = 0,17 \text{ m}$$

$$\frac{K}{J} = \frac{1}{5} \quad (C.15)$$

$$K = \frac{1}{5} * 0,17$$

$$K = 0,03 \text{ m}$$

$$E = Da \quad (C.16)$$

$$E = 0,70 \text{ m}$$

$$\frac{W}{Da} = \frac{1}{5} \quad (C.17)$$

$$W = \frac{1}{5} * 0,70$$

$$W = 0,14 \text{ m}$$

C.9. Cálculo del número de Reynolds y Froude en el tanque agitado.

Se tiene una turbina de 6 aspas inclinadas. Se escogió para este sistema y su correcto funcionamiento una velocidad de agitación de 350 RPM. Con esta información se calcula n .

$$n = \frac{RPM}{60} \quad (C.18)$$

$$n = \frac{350}{60}$$

$$n = 5,83 \text{ s}^{-1}$$

Se calcula el número de Froude, al sustituir el resultado del cálculo C.18, la constante gravitacional (9,81 m/s²) y el diámetro del agitador dimensionado en el cálculo C.13.

$$N_{Fr} = \frac{n^2 D a}{g} \quad (C.19)$$

$$N_{Fr} = \frac{5,83^2 * 1,20}{9,81}$$

$$N_{Fr} = 4,16.$$

Se calcula el número de Reynolds.

$$N_{Re} = \frac{D a^2 n \rho}{\mu} \quad (C.20)$$

Sustituyendo los resultados obtenidos en los cálculos C.13 y C.18, así como los resultados observado en el cuadro B.1 fila C6, columna 2 y 3.

$$N_{Re} = \frac{0,70^2 * 5,87 * 1006}{0,204}$$

$$N_{Re} = 14\ 087$$

A partir de la figura 9-14 (Mott, 2006), la cual puede encontrarse en el anexo D, se obtiene un ϕ

$$\phi = 6.$$

C.10. Cálculo de la potencia de agitación para el reactor.

Con los resultados del cálculo F.7 se encuentra el número de potencia a partir de las siguientes ecuaciones al emplear la tabla 9-1 (Mott, 2006), y con este último se obtiene la potencia en Watts requerida para el sistema.

$$\phi = \frac{Np}{(N_{Fr})^m} \quad (C.21)$$

$$m = \frac{1 - \log(N_{Re})}{40} \quad (C.22)$$

Sustituyendo en la ecuación C.22 el resultado del cálculo C.20 se obtiene m.

$$m = \frac{1 - \log(1 \times 10^6)}{40}$$

$$m = -0,078$$

Despejando el número de potencia del cálculo C.21 y sustituyendo los resultados del cálculo C.22 y C.19 se encuentra el número de potencia.

$$Np = 6 * (4,16)^{-0,138}$$

$$N_p = 5,60$$

Se procede entonces con el cálculo de la potencia requerida en el tanque de almacenamiento.

$$P = N_p * n^3 * D\alpha^5 * \rho \quad (C.23)$$

Sustituyendo los valores calculados en C.22, C.18, C.13 y el dato reportado para la densidad en el cuadro B.1 fila 6 columna 2, se estima la potencia del agitador.

$$P = (4,93) * (5,83)^3 * (1,20)^5 * (1\ 006)$$

$$P = 18\ 762\ W * (1 / \eta), \text{ con una eficiencia del } 75\ %.$$

$$P = 25\ HP$$

C.11. Cálculo de las dimensiones de los sedimentadores.

Se van a colocar 4 sedimentadores pequeños de 3,75 m³, ya que resulta menos costoso y más eficiente que un solo decantador grande.

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (C.24)$$

Restricción de diseño para un decantador:

$$D = 0,5 * H \quad (C.25)$$

Sustituyendo C.25 en C.24 se obtiene el diámetro de los sedimentadores.

$$H = \sqrt[3]{\frac{4 * 3,75}{\pi * 0,5^2}}$$

$$H = 2,70\ m$$

$$D = 0,5 * 2,70$$

$$D = 1,35 \text{ m}$$

C.12. Cálculo de las dimensiones del tanque de almacenamiento.

Tanque de producto listo mismo tamaño que el aceite decantado. Se estimó para la producción de 1 semana. Partiendo que es vertical, donde el diámetro y altura son iguales.

$$D = H = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{\pi}} \quad (\text{C.26})$$

Entonces se resuelve y al final se aplica un factor de seguridad del 80 %.

$$D = H = \sqrt[3]{\frac{4 * 125}{\pi}} * \left(\frac{1}{0,80}\right)$$

$$D = H = 6,78 \text{ m}$$

De manera análoga pero para 1 mes de producción se hizo el dimensionamiento para el tanque de ácido sulfúrico, y se obtuvieron las siguientes dimensiones:

$$D = H = 4,24 \text{ m}$$

C.13. Cálculo de las características necesarias en la centrifugadora (Metodología del Perry's)

La fuerza centrífuga relativa determina el nivel de separación que se va a tener. Según ASTM (2011), debe ser de 800 rcf.

A partir de la figura 18-139 del Perry's se obtiene a partir de rcf el diámetro ($D = 1,78 \text{ m}$)

$$rcf = D \left(\frac{RPM}{265} \right)^2 \quad (C.27)$$

Sustituyendo se calcula las RPM que debe de tener.

$$\Omega = \sqrt{\frac{800 \cdot 265}{1,78}} = 345 \text{ RPM}$$

Se procede a calcular las gravedades necesarias a partir de la figura 18-139 del Perry's.

$$\frac{G}{g} = 100$$

Sustituyendo en la siguiente ecuación se obtiene la potencia de la centrifugadora.

$$P = 5,984 (10^{-10}) (\text{sg}) (Q) \left(\frac{2}{D} \Omega \right)^2 \quad (C.28)$$

$$P = 5,984 (10^{-10}) * 0,924 * 13,69 * (0,89 * 800)^2$$

$$P = 2,91 \text{ HP}$$

C.14. Cálculo del flujo de Diesel requerido para calentar el agua a 80 °C.

El flujo de energía está dado por la ecuación C.29.

$$Q = m * C_p * \Delta T \quad (C.29)$$

Despreciando las pérdidas de energía al medio, el calor brindado por el fluido caliente debe ser igual al ganado por el aceite. De este modo se puede calcular el flujo energético que debe brindarse. Sustituyendo los datos del cuadro B.1, fila 4 y columna 4; así como el resultado del cálculo C.6; tomando como temperatura final 50 °C y de inicial la ambiental, se calcula el flujo calórico para el aceite.

$$Q_{\text{Aceite}} = 5,2705 * 2457 * (50 - 25,9) = 312,1 \text{ kW.}$$

$$Q_{\text{Combustible}} = PC * m \quad (\text{C.30})$$

$$m = \frac{312,1}{2424} = 0,1028 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Para 30 minutos de calentamiento, se consume:

$$m = 185 \text{ kg de diesel.}$$

Traducido a litros según el manual de productos de RECOPE S.A. serían:

$$\text{Litros de Diesel por tanda} = 230 \text{ L.}$$

C.15. Cálculo de los flujos másicos de las corrientes 6, 7 y 8.

Realizando un balance de materia, tomando como sistema el decantado del lodo ácido y empleando las fracciones de las mismas en el cuadro B.2, filas 8, 9 y 10 de la columna 3. Se pueden estimar las corrientes 6, 7 y 8 del proceso.

$$F6 = F5 + F4 \quad (\text{C.31})$$

$$F7 = F5 - X_{F6} F6 \quad (\text{C.32})$$

$$F8 = F6 - F7 \quad (\text{C.33})$$

Sustituyendo y resolviendo:

$$F6 = 0,527 \text{ 1} + 5,270 \text{ 5}$$

$$F6 = 5,7976 \text{ kg/s}$$

$$F7 = 0,527 \text{ 0} - 0,05 * 5,797 \text{ 6}$$

$$F7 = 0,237 \text{ 1 kg/s}$$

$$F8 = 5,797\ 6 - 0,237\ 1$$

$$F8 = 5,560\ 5\ \text{kg/s}$$

C.16. Cálculo de los flujos máxicos de las corrientes 9, 10, 11 y 12.

Realizando un balance global alrededor de la cámara de mezclado se obtiene:

$$F10 = F9 + F8 \quad (\text{C.34})$$

$$F9 = X_{F8} (F8) \quad (\text{C.35})$$

$$F11 = F10 - F9 - 0,04 * F8 \quad (\text{C.36})$$

$$F12 = F10 - F11 \quad (\text{C.37})$$

Sustituyendo en C.35 el resultado del cálculo C.33 y el 3 % m/m respecto al total para la cantidad de óxido de calcio.

$$F9 = 0,03 * 5,560\ 5$$

$$F9 = 0,1668\ \text{kg/s}$$

Sustituyendo el resultado anterior y el del cálculo C.33 se obtiene el flujo de F9.

$$F10 = 0,166\ 8 + 5,560\ 5$$

$$F10 = 5,727\ 3\ \text{kg/s}$$

Sustituyendo el resultado de los cálculos C.33, C.34 y C.35, se obtiene el flujo 11.

$$F11 = 5,727\ 3 - 0,166\ 8 - 0,04 * 5,560\ 5$$

$$F11 = 5,388\ 1\ \text{kg/s.}$$

$$F12 = 5,727\ 3 - 0,336\ 2$$

$$F12 = 0,339\ 2\ \text{kg/s.}$$

C.17. Cálculo de la potencia de las bombas para aceite.

Para esta estimación de las bombas de desplazamiento positivo, se empleó una distancia entre equipos $L = 6$ m, definido por seguridad de la planta. La diferencia de alturas se estima en 3 m, ya que el equipo más alto es el sedimentador y esa es su dimensión. La velocidad inicial es cero debido a que sale de un tanque o reactor o fluido que no está en movimiento y la final es la de diseño, 3 m/s. La eficiencia del equipo será de un 75 %. De esta manera se procede a calcular la potencia para la bomba que carga en el sedimentador el aceite sucio, para las demás el procedimiento es análogo.

En primera instancia se calcula el número de Reynolds.

$$N_{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (C.36)$$

Sustituyendo el resultado del cálculo C.3, la velocidad de tubería de 3 m/s y las propiedades reportadas en el cuadro B.1 fila 2, columnas 2 y 3.

$$N_{Re} = \frac{939 * 3 * 0,0627}{0,146} = 1210$$

Como N_{Re} es menor a 2000, se calcula f de la siguiente manera:

$$f = \frac{16}{N_{Re}} \quad (C.37)$$

$$f = \frac{16}{1210} = 0,01322$$

Se calculan las pérdidas por fricción:

$$4 f \frac{L V^2}{D^2} \quad (C.38)$$

Sustituyendo el resultado del cálculo C.37, la distancia propuesta $L = 6$ m, la velocidad de diseño 3 m/s y el resultado del cálculo C.3, se obtiene:

$$h_f = 4 * 0,01322 * \frac{6}{0,0493} * \frac{3^2}{2} = 28,96$$

La potencia de la bomba se estima con la ecuación de Bernoulli mostrada en el cálculo C.39 a continuación.

$$\left(\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gH + \eta W_p \right)_a = \left(\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gH + h_f \right)_b \quad (C.39)$$

Sustituyendo todo lo descritos en los cálculos C.39 y C.38, así como las suposiciones planteadas al inicio del presente cálculo, se despeja y obtiene la potencia requerida.

$$\left(\frac{18\,423}{939} + (0,75)W_p \right)_a = \left(\frac{3^2}{2} + 9,81 * 3 + 28,96 \right)_b$$

$$W_p = 57,69 * 939 = 54,1 \text{ kW}$$

Sin embargo recuérdese que según el diseño se manejaron bombas en paralelo con dos sistemas de alimentación, con el fin de requerir bombas de menor tamaño y minimizar costos, de este modo la potencia de cada bomba:

$$W_p = 27,0 \text{ kW}$$

C.18. Dimensionamiento del intercambiador de calor.

Se plantearon varios posibles intercambiadores de calor, desde una horquilla hasta un intercambiador de coraza y tubo de 3 pasos por la coraza, manejando un equilibrio entre el costo del equipo y lo que se requiere en el diseño, el intercambiador que cumplió mejor las expectativas fue de dos pasos por la coraza y uno por los tubos, a continuación se detalla su dimensionamiento.

Cálculo de la temperatura logarítmica media:

$$MLDT = \frac{(T_2 - t_1) - (T_1 - t_2)}{\ln \left[\frac{(T_2 - t_1)}{(T_1 - t_2)} \right]} \quad (C.40)$$

Utilizando los datos del Cuadro B.3, filas 13, 14, 15 Y 16, columna 2.

$$MLDT = \frac{(50 - 25,9) - (80 - 50)}{\ln \left[\frac{(50 - 25,9) - (80 - 50)}{(50 - 25,9) - (80 - 50)} \right]} = 26,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cálculo de R:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (C.41)$$

Utilizando los datos del Cuadro B.3, filas 13, 14, 15 y 16, columna 2.

$$R = \frac{80 - 50}{50 - 25,9} = 1,24$$

Cálculo de S:

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (C.42)$$

Utilizando los datos del Cuadro B.3, filas 13, 14, 15 y 16, columna 2.

$$S = \frac{50 - 25,9}{80 - 25,9} = 0,45$$

Cálculo de F_T :

$$F_T = \frac{\left[\sqrt{R^2 + 1} / 2 (R - 1) \right] \ln(1 - S) / (1 - RS)}{\ln \left(\frac{(2/S) - 1 - R + \left(\frac{2}{S} \right) \sqrt{(1 - S)(1 - RS) + \sqrt{R^2 + 1}}}{(2/S) - 1 - R + \left(\frac{2}{S} \right) \sqrt{(1 - S)(1 - RS) - \sqrt{R^2 + 1}}} \right)} \quad (C.43)$$

Sustituyendo los valores obtenidos en los cálculos C.42 y C.41.

$$F_T = \frac{\left[\sqrt{1,24^2 + 1} / 2 (0,45 - 1) \right] \ln(1 - 1,24) / (1 - 1,24 * 0,45)}{\ln \left(\frac{(2/0,45) - 1 - 1,24 + \left(\frac{2}{0,45} \right) \sqrt{(1 - 0,45)(1 - 1,24) + \sqrt{1,24^2 + 1}}}{(2/0,45) - 1 - 1,24 + \left(\frac{2}{0,45} \right) \sqrt{(1 - 0,45)(1 - 1,24) - \sqrt{1,24^2 + 1}}} \right)} = 0,825 \text{ } 0$$

Cálculo de ΔT :

$$\Delta T = F_T \cdot MLDT \quad (C.44)$$

Utilizando los datos calculados en C.43 y C.40:

$$\Delta T = 0,8250 \cdot 26,9 = 22,23 \text{ } ^\circ \text{C}$$

Cálculo del área de flujo por la coraza:

$$A_S = \frac{D_1 \dot{C} B}{P_T} \quad (C.45)$$

Utilizando los valores del Cuadro B.3, columna 2, filas:

$$A_S = \frac{0,59 \cdot 0,0064 \cdot 0,2950}{0,0254} = 0,0435 \text{ m}^2$$

Cálculo de la masa velocidad:

$$G = \frac{C_2}{A_S} \quad (C.46)$$

Utilizando los datos calculados en C.6 y C.45:

$$G = \frac{5,27}{0,0435} = 121,11 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

Cálculo del número de Reynolds para la coraza:

$$Re = \frac{G \times D_e}{\mu} \quad (C.47)$$

Utilizando el de diámetro equivalente tabulado en el Cuadro B.3 fila y columna, así como el del cuadro B.1 fila 2 y columna 5, y el resultado del cálculo C.46.

$$Re = \frac{121,11 \times 0,024}{0,204} = 10,86$$

Cálculo de H_o para el lado de la Coraza.

$$h_o = j_H \frac{k}{D_e} \left(\frac{c\mu}{k} \right)^{1/3} \quad (C.48)$$

Utilizando los datos tabulados en el Cuadro B.3, filas 3, columna 2; y el resultado del cálculo C.48

$$h_o = 56 \frac{0,6230}{0,0241} \left(\frac{4186,8-0,204}{0,1384} \right)^{1/3} = 167,36 \frac{W}{m^2 K}$$

Cálculo de H_{io} , para el lado de los Tubos:

$$h_{io} = h_o \frac{d_i}{d_o} \quad (C.49)$$

Utilizando los datos de densidad tabulados en el Cuadro B.3, filas 13, 14, 15 y 16; columna 2. Y el obtenido en el cálculo C.49.

$$h_{io} = 167,36 \frac{0,01480}{0,01905} = 924,71 \frac{W}{m^2 K}$$

Cálculo de la temperatura en la Pared del Tubo:

$$t_w = t_m + \frac{h_o}{h_o + h_{io}} (T_m - t_m) \quad (C.50)$$

Se emplean los datos reportados en el cuadro B.3 filas 13, 14, 15 y 16; columna 2. Además se los resultados obtenidos en C.49 y C.50.

$$t_w = 37,95 + \frac{167,36}{167,36 + 924,71} (65,00 - 37,95) = 54,60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sin embargo al estimar las propiedades y el factor de corrección se puede considerar prácticamente 1.

Cálculo del calor transferido:

$$Q_h = WC(T_1 - T_2) \quad (C.51)$$

Utilizando los datos de calor específico del Cuadro B.1, fila 4, 13 y 14, columna 2. Así como los resultados obtenidos en el cálculo C.1.

$$Q_h = 330,9 \text{ kW}$$

Cálculo del coeficiente global limpio de transferencia de calor:

$$U_c = \frac{h_{i0} \times h_o}{h_{i0} + h_o} \quad (C.52)$$

Utilizando los resultados obtenidos de C.49 y C.48.

$$U_c = \frac{924,71 \times 167,36}{924,71 + 167,36} = 141,71 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor experimental:

$$U_{\text{exp}} = \frac{Q_h}{\pi D_1 L (\text{MLDT}) F_T} \quad (C.53)$$

Utilizando los datos obtenidos en los cálculos C.51, C.3 y un largo de 6 m.

$$U_{\text{exp}} = 330 \text{ 9033,14} * 0,26,94 * 0,83 = 127,96 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cálculo del factor de ensuciamiento:

$$U_D = \left(\frac{1}{U_c} + R_d \right) \quad (C.54)$$

Sustituyendo y despejando R_d a partir de los cálculos C.53 y C.54.

$$R_d = \frac{1}{127,96} - \frac{1}{141,71} = 0,007 \text{ 6}$$

Cálculo de la caída de presión lado de la coraza:

$$\Delta P_s = \frac{4fG^2 D_2 (N+1)}{2 S D_e} \times 10^{-6} \quad (C.55)$$

Se sustituye los datos del cuadro B.3 filas 11, 12 y 9, de la columna 2

$$\Delta P_s = 4 \times 1,44 \times 121,112 \times 0,59 \times 192 \times 0,8 \times 0,0148 \times 10^{-6} = 26,33 \text{ kPa}$$

Cálculo de la caída de presión lado de los tubos:

$$\Delta P_t = 4fG^2L_n2SDe \times 10^{-6} \quad (C.56)$$

$$\Delta P_t = 4 \times 0,009 \times 107,62 \times 6 \times 22 \times 0,989 \times 0,0148 = 9,10 \text{ kPa}$$

Cálculo de la caída de presión total:

$$\Delta P_T = \Delta P_s + \Delta P_t \quad (C.56)$$

Sustituyendo los datos calculados en C.54 y C.55:

$$\Delta P_T = 26,55 + 9,10 = 35,65 \text{ kPa}$$

15. ANEXOS

Anexo 1. Barcos muestreados en la Investigación.

Cuadro D.1. Barcos muestreados en la presente investigación (Propio, 2015).

Barco	Numeración de Viaje	Barco	Numeración de Viaje
1	1azq – 04/08/2014	16	4yut – 25/08/2014
2	3bvg – 05/08/2014	17	8azq – 26/08/2014
3	2hjk – 06/08/2014	18	2pof – 27/08/2014
4	6fds – 07/08/2014	19	3fgk – 28/08/2014
5	3fds – 08/08/2014	20	1kjq – 29/08/2014
6	1bvg – 11/08/2014	21	4hgd – 01/09/2014
7	4hjk – 12/08/2014	22	5hgd – 02/09/2014
8	7azq – 13/08/2014	23	1aqz – 03/09/2014
9	2azq – 14/08/2014	24	3dfs – 04/09/2014
10	5bvg – 15/08/2014	25	2dfs – 05/09/2014
11	1hjk – 18/08/2014	26	1dfs – 08/09/2014
12	8bca – 19/08/2014	27	4kjq – 09/09/2014
13	9bca – 20/08/2014	28	2fpl – 10/09/2014
14	6hjk – 21/08/2014	29	3jgg – 11/09/2014
15	2yut – 22/08/2014	30	2dfu – 12/09/2014

Anexo 2. Calificaciones otorgadas por el Director, lectores y sustentantes empleados en la matriz de selección.

Cuadro D.2. Porcentajes de importancia brindados por el director, lectores y sustentante a los parámetros con los cuales se pretende seleccionar el proceso a llevar a cabo (Madrigal, 2015).

Parámetro	Eduardo Rivera (%)	Adolfo Ulate (%)	José R. Navarro (%)	Adolfo Madrigal (%)	Promedio (%)
Impacto ambiental	15,5	10,0	20,0	10,0	14
Facilidad de operación	10,3	10,0	5,0	9,0	9
Mantenimiento	5,2	10,0	5,0	10,0	7
Costos de equipo	10,3	12,5	15,0	15,0	13
Costos de operación	12,4	12,5	15,0	15,0	14
Seguridad de operación	15,5	12,5	10,0	15,0	13
Desechos	15,5	10,0	8,0	10,0	11
Subproductos	5,2	10,0	7,0	6,0	7
Calidad del producto obtenida	10,3	12,5	15,0	10,0	12

Cuadro D.3. Evaluación brindada por el director, lectores y sustentante a cada tecnología según cada uno de los parámetros escogidos para comparar (Propio, 2015).

Parámetro	Tecnología	Eduardo Rivera	Adolfo Ulate	José R, Navarro	Adolfo Madrigal	Promedio
Impacto ambiental	Sedimentación	1	2	1	2	1,5
	Centrifugación	3	2	3	3	2,8
	Térmico	1	1	1	1	1,0
	Reacción química	2	3	3	2	2,5
	Destilación al vacío	2	2	1	2	1,8
	Extracción con solvente	2	2	1	1	1,5
	Hidrotratamiento	1	1	2	1	1,3
	Arcillas	2	2	3	2	2,3
Facilidad de operación	Sedimentación	3	2	2	2	2,3
	Centrifugación	2	3	3	3	2,8
	Térmico	1	3	1	1	1,5
	Reacción química	2	2	3	3	2,5
	Destilación al vacío	3	2	1	1	1,8
	Extracción con solvente	2	2	1	1	1,5
	Hidrotratamiento	1	1	1	1	1,0
	Arcillas	3	3	3	3	3,0
Mantenimiento	Sedimentación	3	1	3	2	2,3
	Centrifugación	1	3	2	2	2,0
	Térmico	1	3	1	1	1,5
	Reacción química	2	1	3	2	2,0
	Destilación al vacío	3	2	1	1	1,8
	Extracción con solvente	3	2	1	1	1,8
	Hidrotratamiento	2	1	1	1	1,3
	Arcillas	2	2	2	3	2,3
Costos de equipo	Sedimentación	3	3	3	3	3,0
	Centrifugación	1	2	2	2	1,8
	Térmico	1	2	1	1	1,3
	Reacción química	3	0	3	3	2,3
	Destilación al vacío	2	1	1	1	1,3
	Extracción con solvente	2	1	1	1	1,3
	Hidrotratamiento	1	1	1	1	1,0
	Arcillas	2	3	3	3	2,8

Continuación Cuadro D.3. Evaluación brindada por el director, lectores y sustentante a cada tecnología según cada uno de los parámetros escogidos para comparar (Madrigal, 2015).

Parámetro	Tecnología	Eduardo Rivera	Adolfo Ulate	José R. Navarro	Adolfo Madrigal	Promedio
Costos de Operación	Sedimentación	3	2	3	3	2,8
	Centrifugación	2	3	2	2	2,3
	Térmico	1	2	1	1	1,3
	Reacción química	3	0	3	2	2,0
	Destilación al vacío	2	1	2	1	1,5
	Extracción con solvente	2	1	1	1	1,3
	Hidrotratamiento	1	1	0	1	0,8
	Arcillas	2	3	2	3	2,5
Seguridad de Operación	Sedimentación	3	3	2	1	2,3
	Centrifugación	3	2	3	3	2,8
	Térmico	1	1	1	0	0,8
	Reacción química	3	1	2	1	1,8
	Destilación al vacío	2	1	3	2	2,0
	Extracción con solvente	2	2	3	2	2,3
	Hidrotratamiento	2	1	1	1	1,3
	Arcillas	2	2	2	3	2,3
Desechos	Sedimentación	1	2	1	2	1,5
	Centrifugación	3	2	3	3	2,8
	Térmico	1	2	1	1	1,3
	Reacción química	2	1	1	1	1,3
	Destilación al vacío	2	1	2	2	1,8
	Extracción con solvente	1	0	3	3	1,8
	Hidrotratamiento	2	2	2	2	2,0
	Arcillas	1	2	2	2	1,8
Subproductos	Sedimentación	0	0	1	1	0,5
	Centrifugación	0	0	3	1	1,0
	Térmico	0	2	2	1	1,3
	Reacción química	3	1	1	2	1,8
	Destilación al vacío	2	1	2	3	2,0
	Extracción con solvente	1	1	2	2	1,5
	Hidrotratamiento	0	1	1	1	0,8
	Arcillas	0	1	1	1	0,8

Continuación Cuadro D.3. Evaluación brindada por el director, lectores y sustentante a cada tecnología según cada uno de los parámetros escogidos para comparar (Madrigal, 2015).

Parámetro	Tecnología	Eduardo Rivera	Adolfo Ulate	José R, Navarro	Adolfo Madrigal	Promedio
Calidad del producto obtenido	Sedimentación	1	2	1	2	1,5
	Centrifugación	3	2	3	3	2,8
	Térmico	1	1	2	1	1,3
	Reacción química	3	2	2	2	2,3
	Destilación al vacío	3	1	3	3	2,5
	Extracción con solvente	2	1	3	3	2,3
	Hidrotratamiento	3	3	3	3	3,0
	Arcillas	3	2	2	2	2,3

Anexo 3. Resumen de Norma ASTM-D1796-11: Metodología estándar para medir el sedimento y agua..

Esta norma cuantifica el contenido de agua y sedimento en aceites combustibles, aplica en un ámbito de 0 - 30 % V/V.

Definiciones.

- rcf: Fuerza relativa centrífuga.
- BSW: Agua y sedimento.

Equipo requerido y sustancias por emplear.

- 1 Centrifugadora capaz de emplear dos o más tubos cónicos para centrífuga de 8 pulgadas. Capaz de controlar y brindar velocidades de 500 a 800 rcf.
- Baño maría para temperaturas de 60 ± 1 °C.
- Tubos de fondo cónico graduados para 100,00 mL con un nivel de 0,05 mL, donde lo mínimo que se mide es 0,025 mL. Material de vidrio. Se usó el de la figura C.1.
- Mezcla Tolueno-Agua conforme ISO-5272.



Figura C.1. Tubo cónico empleado para medir agua y sedimento empleado conforme ASTM-D1796-11 (Madrigal, 2015).

Cálculos previos.

Cálculo de la fuerza centrífuga relativa.

$$rcf = d \left(\frac{r/min}{265} \right)^2 \quad (1)$$

Donde: rcf: fuerza centrífuga relativa.

d: diámetro de la centrifuga entre tubos, mm.

r/min: revoluciones por minuto, rpm.

Nota para el tubo empleado, el cual es de 203 mm, se emplea una velocidad de rpm para 800 rcf.

Procedimiento.

- Llene los dos tubos a la marca de 50,00 mL con el aceite y los otros 50,00 mL con la mezcla de tolueno-agua. Agite vigorosamente los tubos. Colóquelos en un baño maría a 60 ± 1 °C por 10 minutos.
- Agite los tubos nuevamente e inviértalos para asegurar que el solvente está distribuido uniformemente en todo el aceite.
- Coloque los tubos en la centrifugadora de manera opuesta, en caso de contar con más de dos ranuras equilibre los pesos con tubos llenos con agua.
- Haga girar la centrifuga por 10 min a la velocidad calculada para producir una fuerza entre 500 y 800 rcf.
- Si no se observa separación en el fondo entre 0,1 y 1 mL de graduación, ponga a girar por 10 minutos más.
- Repita este procedimiento hasta que 2 medidas consecutivas obtengan el mismo volumen de agua y sedimento.

Cálculos.

$$V = V_1 + V_2 \quad (2)$$

Donde: V: Agua y sedimento en la muestra, %V/V.

V₁: Volumen final de agua y sedimento en la muestra del tubo 1, mL.

V₂: Volumen final de agua y sedimento en la muestra del tubo 2, mL.

Anexo 4. Cotizaciones realizadas.

Cuadro D.4. Cotizaciones realizadas para los equipos y otros aspectos a considerar del análisis económico (Madrigal, 2015).

Equipo / Rubro	Descripción de la cotización
Tanque ácido sulfúrico	Se cotizó con Montajes Industriales DUQUE S.A. y se obtuvo un costo de \$15 000 lo cual incluye el costo del tanque, transporte e instalación en Moín
Bombas de desplazamiento positivo	Se requieren en total 9 bombas de desplazamiento positivo para trasegar el aceite y los productos intermedios a lo largo del proceso. Estas bombas fueron cotizadas con la empresa "PumPortal" en Estados Unidos, y las mismas son de acero inoxidable, a prueba de explosiones y con una capacidad máxima de 420L/min. Para estas características el precio unitario de cada bomba es de \$4 900. Además este producto es traído desde los Estados Unidos, por lo que se deben pagar impuestos para traer el producto a Costa Rica. Este impuesto se obtiene del sitio web del Ministerio de Hacienda y para bombas corresponde a un 32%.
Bomba para ácido	Fue cotizada con la empresa "PumPortal" en Estados Unidos y es de acero inoxidable, con una capacidad máxima de 220L/min. El precio de esta bomba es de \$3 000 y por concepto de impuestos se deben pagar \$960.
Centrífugadora	La centrífuga se utiliza para la separación parcial del agua de la mezcla del aceite de desecho que entra al sistema con el objetivo de disminuir los requerimientos de ácido sulfúrico en el reactor. Esta fue cotizada con la empresa China Liaoyang Zhonglian Machinery Co, Ltd. Tiene 26 kW de potencia y 1 año de garantía. La misma tiene un Costo de \$40 000 y se debe pagar un 32% de impuestos que corresponde a \$12 800.
Reactores	Se ocupan 4 tanques agitados de 8 m ³ . Son hechos en hierro y recubiertos con fibra de vidrio. La cotización de este equipo se realizó con la empresa Montajes Industriales DUQUE S.A. y se obtuvo un costo de \$48 000 para los 4, que incluye el transporte e instalación de los mismos en Moín.

Continuación Cuadro D.4. Cotizaciones realizadas para los equipos y otros aspectos a considerar del análisis económico (Madrigal, 2015).

Equipo	Descripción de la cotización
Decantadores	Se ocupan 4 decantadores para separar el agua libre. Este fue cotizado con la empresa española "Totagua" y se obtuvo un costo de \$10 500 y un monto de impuestos de \$1 680, para los 4. Tienen una capacidad de 3,75 m ³ .
Tanques de Aceite	Como se está trabajando con un combustible, este debe contar con las especificaciones requeridas para tanque de almacenamiento de combustibles que incluye entre otras características techo flotante y chaqueta de calentamiento eléctrica. Estas características elevan el costo del tanque. La cotización se realizó con la empresa Montajes Industriales DUQUE S.A. y se obtuvo un costo de \$75 000 por ambos tanques, puestos e instalados en Moín.
Laboratorio de control de calidad.	La planta cuenta con un pequeño laboratorio para llevar a cabo los controles de calidad del producto final. Para este propósito se requiere principalmente de una bomba calorimétrica y de una centrífuga analógica para laboratorio. La centrífuga fue cotizada en Diprolab. Mientras que para el costo de la bomba calorimétrica en la empresa Equipar S.A. De esta forma se obtuvo que el costo de la bomba calorimétrica y la centrífuga que en conjunto suman \$25 000.
Instalación y Mano de Obra	Basado en el Peter's, 5 % del costo de los equipos.
Terreno, Cisternas y Edificación.	Consulta al experto y dueño de la empresa ACASE S.A. Este empresario cuenta con el terreno en Moín, con una edificación apta para la instalación de esta planta. Y con una cantidad de 7 cisternas aptas para este negocio. Él estima que su capital ronda los \$60 000
Honorarios del contratista y eventualidades	El Peter's recomienda un 7 % y 20 % de la inversión de capital fijo respectivamente

Continuación Cuadro D.4. Cotizaciones realizadas para los equipos y otros aspectos a considerar del análisis económico (Madrigal, 2015).

Equipo / Rubro	Descripción de la cotización
Ingeniería, Planos, Contratista y Permisos	Se consultó con el ingeniero Luis Murillo, gerente de proyectos en Ingelectra S.A. En este caso se nos indicó que el costo de ingeniería suele ser de un 10% de la inversión de capital fijo, y de esta manera se estima que el costo de ingeniería ronda los \$58 841
Mantenimiento	Incluye mantenimiento o reparaciones en caso de ser necesarios durante la vida útil del proyecto. El Peter's estima entre un 2% y 10% de la inversión de capital fijo. Se estima con el escenario menos optimista de 10% y se obtiene un valor de \$58 841.
Sistemas contra incendios y gastos en tratamientos de aguas.	El Peter's indica que estos sistemas de protección contra incendios se usa entre un 0,3% – 1% de la inversión de capital fijo. Nuevamente se utiliza el escenario más pesimista (1%) y se estima un costo de \$5 884.
Ácido Sulfúrico y Óxido de Calcio	1 litro de ácido sulfúrico 98 % de pureza tiene un precio de \$8,4. El costo incluye la puesta de la materia prima en Moín. El saco (30 kg aprox) de Ca(OH) se comercializa en \$30. Consultados con Bioenergías de Costa Rica S.A..
Diesel	Precio del Diesel (29/07/2015) 498 colones. Fuente: Pag. Web de Recope.
Impuestos de entrada al país.	Consulta a la agente aduanera Ing. Andrea Nuñez. Para este caso y los equipos que se están ingresando brindó un rango entre los \$7 500 y \$10 000. Se eligió utilizar como referencia los \$10 000 ya que desea analizarse en un caso pesimista la viabilidad del proyecto.

Calculadora para Préstamos en Dólares

El resultado es un valor aproximado, el cual no incluye pólizas. Para obtener los datos correctos deberá visitar cualquier oficina del BCR.

Datos de Entrada

Ingrese el monto del crédito: \$

Seleccione el tipo de crédito:

Seleccione el plazo en años: años

Resultado

Pago mensual aproximado: \$

Última actualización: 29-Jun-2015

Figura D.1. Calculadora de préstamos del BCR (BCR, 2015)

TABLA DE CARACTERISTICAS					
DATOS TECNICOS DE LOS FILTROS	Unidades	TAMAÑOS NOMINALES			
		12" x 12"	14" x 14"	16" x 16"	24" x 24"
	Pulg.	12" x 12"	14" x 14"	16" x 16"	24" x 24"
	cm.	30 x 30	35.5 x 35.5	40 x 40	61 x 61
NUMERO NORMAL DE PLATOS Durapol	Un.	9	17	17	17
NUMERO NORMAL DE MARCOS Durapol	Un.	8	16	16	16
AREA DE FILTRACION POR PLATO	m ²	0.11	0.16	0.2	0.54
AREA DE FILTRACION TOTAL	m ²	0.9	2.6	3.2	8.6
VOLUMEN DE TORTA POR MARCO	Litro	1.1	1.8	2.2	6.8
VOLUMEN TOTAL DE TORTA	Litro	8.8	29	35	109
TIPO DE CIERRE: MANUAL		X	X	X	
TIPO DE CIERRE: HIDRAULICO			X	X	X
FUERZA CIERRE HIDRAULICO	Ton.		15	15	30
PRESIÓN MÁXIMA BOMBA HIDRAULICA	Lb./Pulg. ²		10000	10000	10000
PRODUCCION DE FILTRADO APROXIMADO					
• Agua con baja cantidad de sólidos	m ³ /hr.	2.2 - 4.5	6.3 - 12.6	7.0 - 21	20 - 40
• Aceite vegetal	m ³ /hr.	0.1 - 0.4	0.3 - 0.1	0.4 - 1.3	1.0 - 3.5
• Jugos de frutas no cítricas	m ³ /hr.	0.2 - 0.6	0.5 - 1.6	0.6 - 2.0	1.7 - 5.2
PRESION NORMAL DE BOMBEO DEL LIQUIDO	Lb./Pulg. ²	20	30	30	30
PRESION MÁXIMA DE BOMBEO DE LIQUIDO	Lb./Pulg. ²	40	60	60	60
PESO BRUTO APROXIMADO	Kg.	110	290	350	1100

Figura D.2. Catálogo de filtros prensa (COREL y Cía S.A, 2012).

Anexo 5. Temperaturas promedio de Moín según el IMN.

Cuadro D.5. Temperaturas promedio de Moín para el año 2013 (IMN; 2013)

Mes	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Promedio (°C)
Enero	20,7	28,9	24,8
Febrero	20,7	29,1	24,9
Marzo	21,3	29,7	25,5
Abril	22,0	30,1	26,1
Mayo	22,8	30,4	26,6
Junio	22,9	30,3	26,6
Julio	22,6	29,6	26,1
Agosto	22,5	30,1	26,3
Setiembre	22,5	30,6	26,6
Octubre	22,3	30,4	26,4
Noviembre	22,0	29,4	25,7
Diciembre	21,2	28,9	25,1
Promedio	/	/	25,9

Anexo 6. Figuras de otras referencias utilizadas.

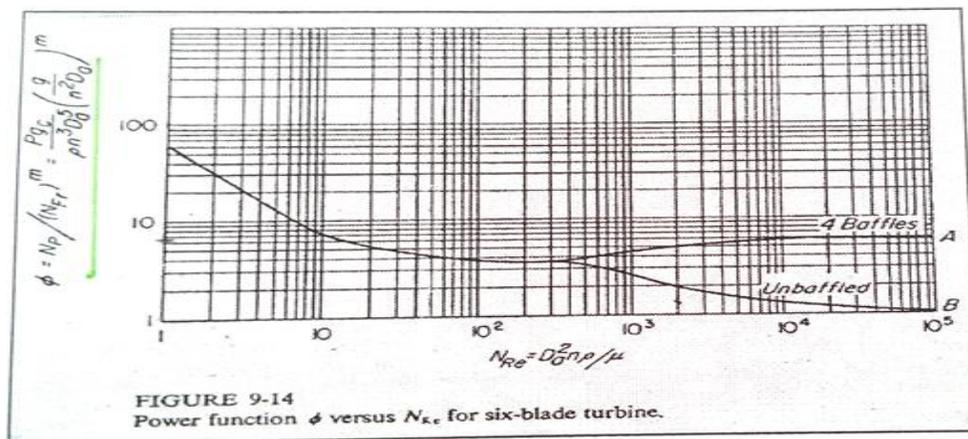


Figura D.3. Figura del Mott empleada para determinar el número de potencia.

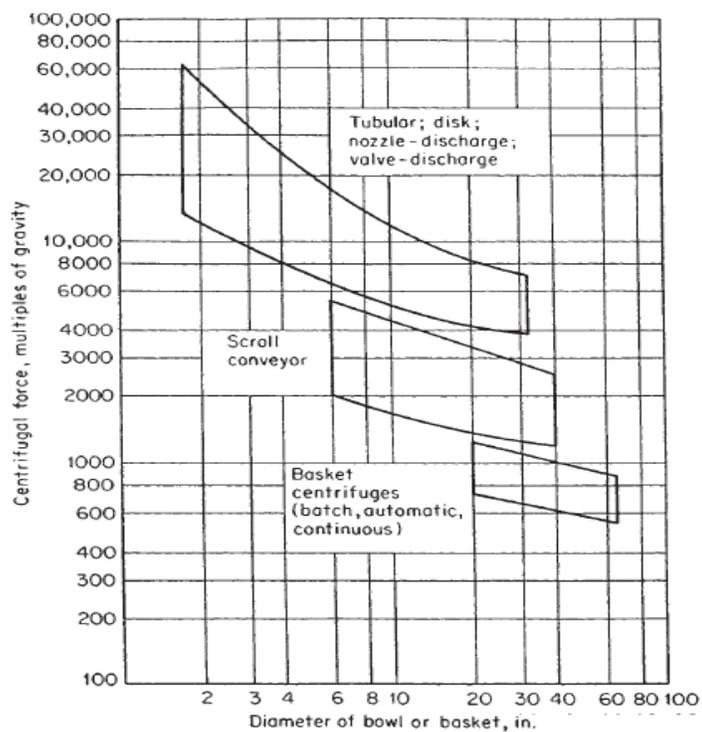


Figura D.3. Figura del Perry empleada para determinar el tamaño de la centrifuga.

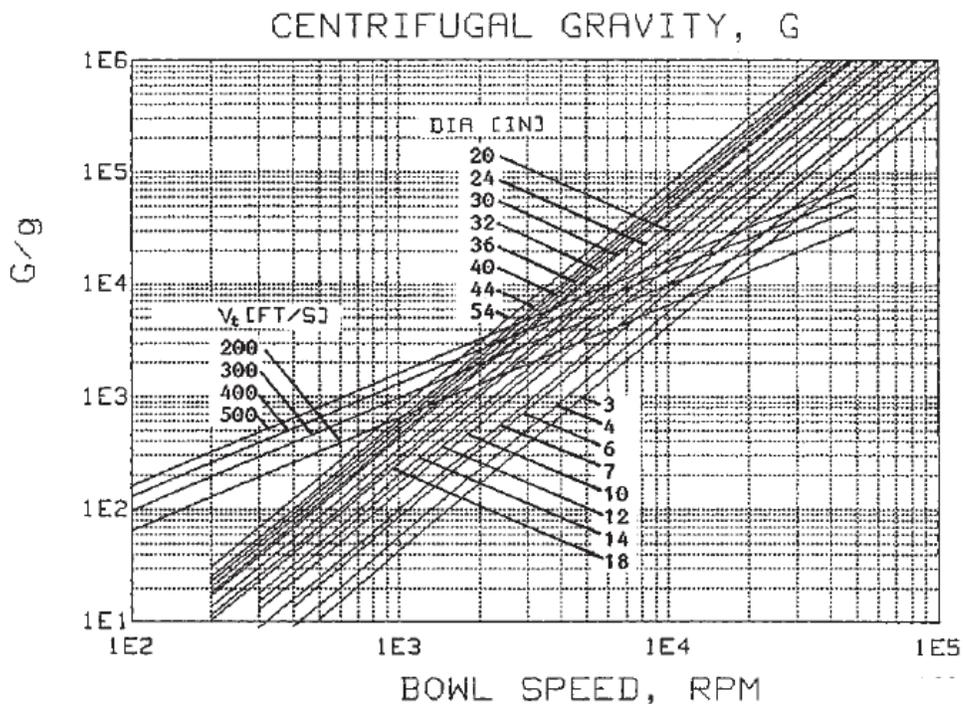


FIG. 18-140 Variation of centrifugal force with r/min.

Figura D.4. Figura del Perry empleada para determinar el tamaño de la centrifuga.

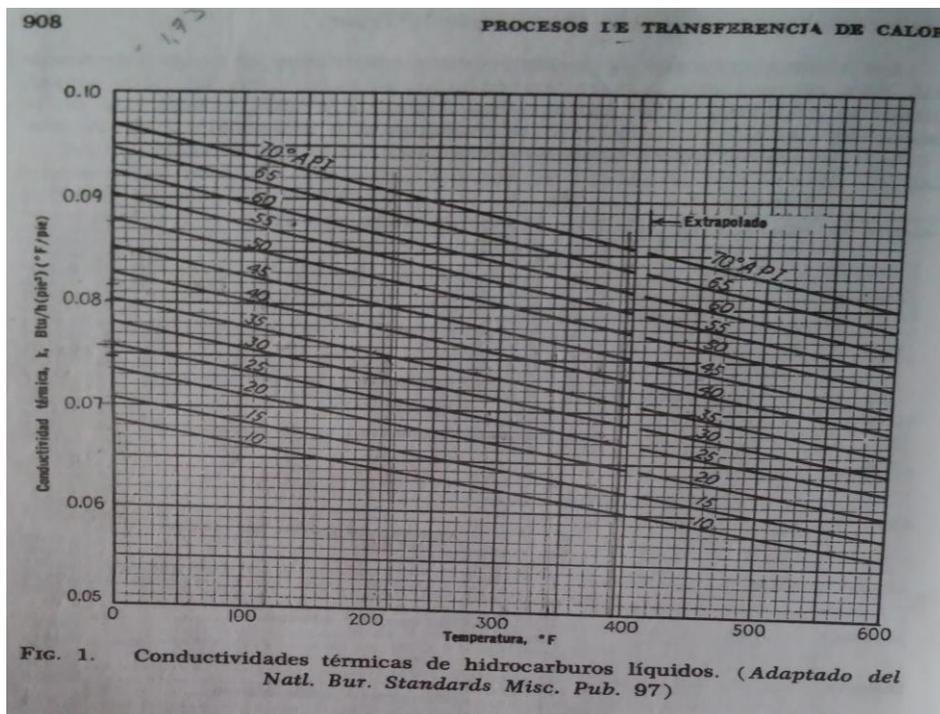


Figura D.5. Figura del Kern empleada para determinar el tamaño del intercambiador

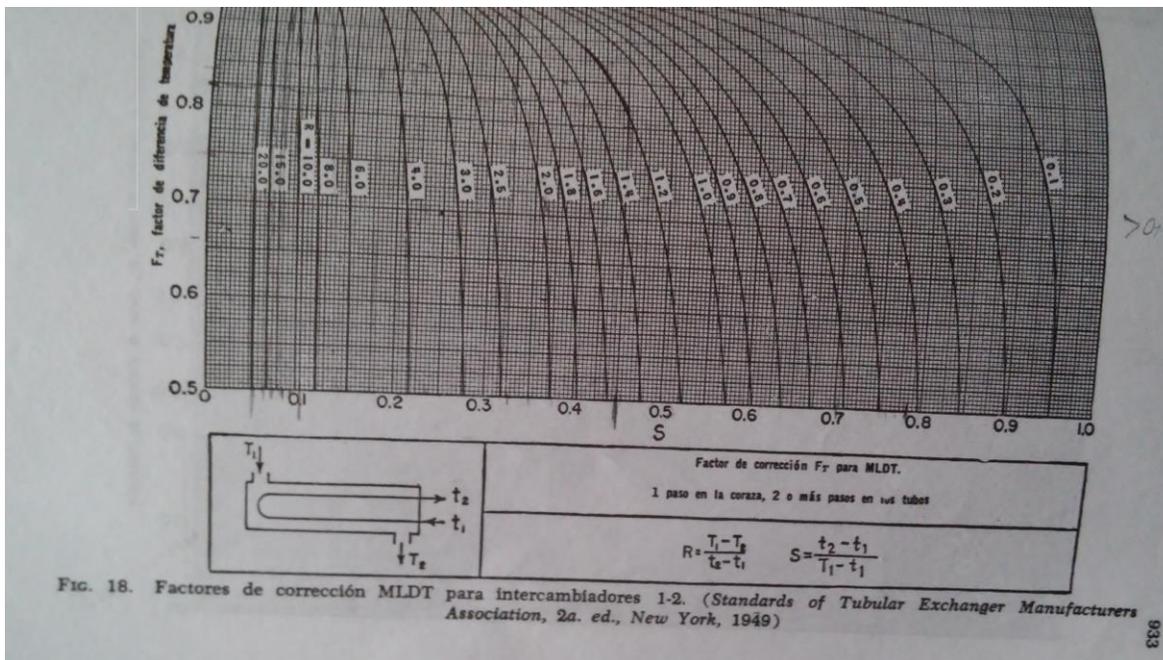


Figura D.6. Figura del Kern empleada para determinar el tamaño del intercambiador

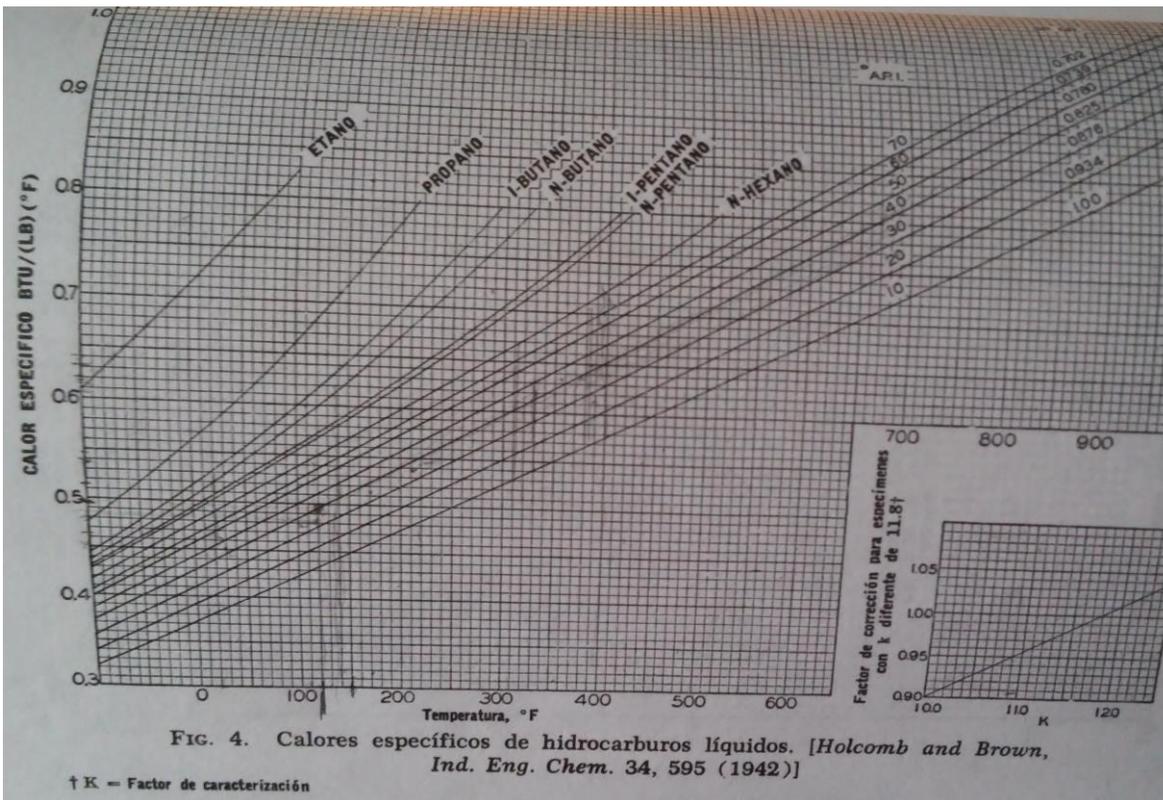


Figura D.7. Figura del Kern empleada para determinar el tamaño del intercambiador



Figura D.8. Fotografía de separación de agua libre y de la simulación del reactor.

