

**CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE SENTINA Y PROPUESTA
BÁSICA DE TRATAMIENTO PARA SU RECUPERACIÓN**

DIANA FERNANDA GALVIS CARREÑO

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

2011

**CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE SENTINA Y PROPUESTA
BÁSICA DE TRATAMIENTO PARA SU RECUPERACIÓN**

DIANA FERNANDA GALVIS CARREÑO

Trabajo de grado como requisito parcial para optar al

Título de Ingeniera Química

Director:

RAMIRO MARTINEZ REY, Ph.D.

Ing. Germán Bonilla

Co-director de Proyecto de Grado

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

2011

*A DIOS,
POR TODAS LAS BENDICIONES QUE HA DERRAMADO SOBRE MÍ
Y POR DARME LA OPORTUNIDAD DE DESARROLLAR ESTE PROYECTO.*

*A MI PADRE HÉRIBERTO GALVIS
MI MADRE LUDY CARREÑO
Y MI HERMANA LAURA GALVIS,
POR SU CONFIANZA, SU APOYO CONSTANTE, SU PACIENCIA Y SU AMOR.*

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ramiro Martínez Rey, por su colaboración como Director de este proyecto.

A los Ingenieros Germán Alberto Bonilla Dulcey y Germán Arciniegas, por toda su colaboración como Co-directores de este proyecto.

A la familia Cabarcas Ramírez y la empresa SERBUCYC en Cartagena por su estadía y colaboración durante el proceso de recolección de muestras del presente trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Ingeniería Química, por el enriquecimiento tanto intelectual y personal durante todo el proceso de formación como una excelente profesional.

A mis amigos y todas las personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO REFERENCIAL	14
1.1 LA SENTINA.....	14
1.2 ACEITE LUBRICANTE	14
1.3 EL ACEITE LUBRICANTE USADO.....	15
1.4 EL ACEITE LUBRICANTE USADO COMO COMBUSTIBLE	17
1.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS DESECHOS DE SENTINA.....	18
2. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	20
2.1 RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS.....	20
2.2 DETERMINACION DEL CONTENIDO DE AGUA.....	21
2.3 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE	22
2.4 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.....	24
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	25
3.1 CONTENIDO DE AGUA	25
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE SECO.....	27
3.3 EL ACEITE COMO COMBUSTIBLE ALTERNO	32
3.4 RESULTADOS CARACTERIZACIÓN DEL AGUA	33
3.5 PROPUESTA BÁSICA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE SENTINA.....	33
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEITES USADOS EN COLOMBIA.....	16
TABLA 2. COMPOSICIÓN DE CONTAMINANTES EN ACEITES LUBRICANTES USADOS.....	16
TABLA 3. PORCENTAJES PARA MEZCLAS Y LÍMITES MÁXIMOS DE CONTAMINANTES EN ACEITES USADOS Y TRATADOS.	18
TABLA 4. PROPIEDADES GENERALES DEL ACEITE USADO (PROMEDIO).....	32
TABLA 5. COSTOS DE LOS EQUIPOS.	38

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE BLOQUES: METODOLOGÍA	20
FIGURA 2. MONTAJE PRUEBAS DE DESTILACIÓN	22
FIGURA 3. RESULTADOS PRUEBA DE DECANTACIÓN	25
FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL CONTENIDO DE AGUA.....	26
FIGURA 5. SEPARACIÓN RESULTANTE DE LA DESTILACIÓN	27
FIGURA 6. VISCOSIDAD DE LOS ACEITES SECOS A 40 Y 100°C	28
FIGURA 7. PUNTO DE INFLACIÓN DE LOS ACEITES SECOS.....	28
FIGURA 8. CALOR DE COMBUSTIÓN DE LOS ACEITES SECOS.	29
FIGURA 9. RESERVA ALCALINA DE LOS ACEITES SECOS.	30
FIGURA 10. CONTENIDO DE METALES DE DESGASTE EN LOS ACEITES SECOS.....	31
FIGURA 11. CONTENIDO AZUFRE EN LOS ACEITES SECOS.	31
FIGURA 12. DIAGRAMA DE BLOQUES TRATAMIENTO DE SENTINAS	34
FIGURA 13. PROPUESTA DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE SENTINAS.....	36
FIGURA 14. DIAGRAMA DE GANTT.....	38

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. SISTEMA INTEGRAL DE GESTIÓN PARA LOS ACEITES USADOS...	44
ANEXO B. MARCO NORMATIVO PARA EL APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN DEL ACEITE USADO. NORMATIVIDAD COLOMBIANA.....	46
ANEXO C. PROPIEDADES DE CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE SENTINA.....	48
ANEXO D. SEGURIDAD Y MANEJO DE RESIDUOS DURANTE EL DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	51
ANEXO E. ETAPA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	52
ANEXO F. CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES DE SENTINA.....	55
ANEXO G. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE SENTINA	62
ANEXO H. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS	65
ANEXO I. RESULTADOS PRUEBAS DE AGUA.....	68
ANEXO J. COTIZACIÓN DE EQUIPOS.....	72

RESUMEN

Título: CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE SENTINA Y PROPUESTA BÁSICA DE TRATAMIENTO PARA SU RECUPERACIÓN.

Autor: DIANA FERNANDA GALVIS CARREÑO

Palabras claves: Residuos peligrosos, Sentina, Aceite Lubricante Usado, Recuperación de los Aceites Usados, Combustible Alternativo, Manejo de Residuos.

Actualmente, la preocupación por la contaminación por hidrocarburos en los océanos está tomando mayor importancia y son las descargas ilegales de sentina la principal fuente de esta contaminación dado su alto contenido de aceites lubricantes usados, los cuales son considerados residuos tóxicos y peligrosos, se sabe que un litro de aceite, puede contaminar un millón de litros de agua, formando una capa superficial que impide el intercambio de oxígeno en el agua provocando la muerte de la fauna marina, si a lo anterior le sumamos la crisis energética y la subsecuente alza en los precios del petróleo y sus derivados y el elevado poder calorífico que poseen los aceites lubricantes usados el cual los convierte en un sustituto potencial de los combustibles tradicionales, surge la necesidad de implementar sistemas de gestión para este tipo de residuos que generen una alternativa económica y ambientalmente viable aprovechando su fuente de energía.

El objetivo del presente trabajo, es realizar la caracterización de los residuos de sentina con el fin conocer sus propiedades físicas y químicas, determinar la factibilidad de emplear los aceites lubricantes usados contenidos en los residuos de sentina como un combustible alterno y realizar una propuesta básica de tratamiento que garantice el cumplimiento de la normatividad legal en la disposición de estos residuos.

Trabajo de Grado.

-Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química.

Director: Dr. Ramiro Martínez Rey. Co-director: Ing. Germán Bonilla

ABSTRACT

Title: CHARACTERIZATION OF BILGE WASTE AND BASIC PROPOSAL FOR ITS RECOVERY TREATMENT.

Author: DIANA FERNANDA GALVIS CARREÑO

Keywords: Hazardous waste, bilge, used lubricating Oil, Used Oil Recovery, Alternative Fuel, Waste Management.

Currently, concerns about oil pollution in the oceans are becoming more important and illegal bilge discharges are the main source of this pollution because of its high content of used lubricating oils, which are considered hazardous waste, we know that liter of oil can contaminate one million liters of water, forming a surface layer which prevents the exchange of oxygen in the water killing marine life, also adding the energy crisis and the subsequent rise in oil prices and its derivatives and the high calorific value of lubricating oils used have, make them a potential substitute for traditional fuels, appears a need to implement management systems for this waste to generate an economic alternative taking advantage of environmentally viable energy source.

The aim of this work is to characterize the bilge waste to learn their physical and chemical properties, determine the feasibility of using used lubricating oils contained in the bilge waste as alternative fuel and make a basic proposal manner that ensures compliance with legal regulations on the disposal of these wastes.

· Degree Work.

· School of Physical and Chemical Engineering, School of Chemical Engineering.

Director: Dr. Ramiro Martínez Rey. Co-director: Germán Bonilla

INTRODUCCIÓN

Las mareas negras producidas por accidentes en buques petroleros y el vertido resultante de las operaciones rutinarias de buques y de actividades ilegales, son fuentes importantes de la contaminación por hidrocarburos de los océanos. Aunque los accidentes petroleros atraen la atención internacional, no constituyen una fuente importante de contaminación por hidrocarburos en los mares, excepto en el lugar donde se produce el accidente. Sin embargo, la cantidad total de hidrocarburos procedentes de vertidos por limpieza de tanques, descargas de sentina y operaciones de barcos es mucho mayor y mucho más persistente a largo plazo. Se estima que mientras que los vertidos por accidentes ascienden a unos 37 millones de galones anuales en todo el mundo, los vertidos por operaciones rutinarias superan los 137 millones de galones anuales (1) (2).

Los componentes peligrosos de las aguas de sentina son los hidrocarburos totales de petróleo presente en las mismas, donde el aceite es uno de los principales constituyentes. Un litro de aceite, puede contaminar un millón de litros de agua, formando una capa superficial que impide el intercambio de oxígeno en el agua provocando la muerte de la fauna marina (3) (4). Si a lo anterior le sumamos la crisis energética y la subsecuente alza en los precios del petróleo y sus derivados, así como el elevado poder calorífico que poseen los aceites lubricantes usados convirtiéndolos en un sustituto potencial de los combustibles tradicionales, surge la necesidad de implementar sistemas de gestión para este tipo de residuos que generen una alternativa económica y ambientalmente viable aprovechando su fuente de energía.

El objetivo del presente trabajo, es analizar los residuos de sentina con el fin conocer sus propiedades físicas y químicas y determinar la factibilidad de emplear los aceites lubricantes como un combustible alterno realizando una propuesta de tratamiento básico que garantice el cumplimiento de la normatividad legal tanto en las propiedades del producto como en el tratamiento de los residuos generados.

1. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo, conceptos básicos, complementarios y específicos son definidos con la idea de orientar al lector en el tema central de esta investigación.

1.1 LA SENTINA

La sentina es el espacio en la parte más baja de la sala de máquinas, justo por encima de los doble fondos de los barcos (5). Dentro de éstas se recolectan los aceites lubricantes de desecho resultantes de las maquinarias, los líquidos aceitosos procedentes de pequeñas pérdidas en tuberías, juntas y bombas, el agua de lavado de máquinas y el agua de condensación que se genera en el interior de los barcos por la diferencia de temperaturas entre la atmósfera exterior y la interior. Según el Convenio MARPOL¹, los residuos de sentina, por estar constituidos por aceites lubricantes usados, los cuales son considerados un residuo tóxico y peligroso, no pueden ser vertidos en alta mar y mucho menos en las alcantarillas de las distintas ciudades donde se ubican los puertos; por lo cual aparece la necesidad de implementar una adecuada gestión de dichos residuos.

1.2 ACEITE LUBRICANTE

Aceite lubricante es toda sustancia líquida que gracias a sus propiedades físicas es usada para alterar la naturaleza de la interacción, reducir la fricción y el desgaste entre dos superficies en movimiento relativo, formando una pequeña capa entre ellas para evitar el contacto directo de dichas superficies (6) (7) (8). Los aceites de uso automotriz e industrial, básicamente están constituidos por una base lubricante derivada de hidrocarburos obtenidos por destilación de crudos petrolíferos las cuales determinan las características físicas y químicas de los aceites, mezclados con productos químicos (aditivos) cuya función es proporcionar

¹ Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques, del 2 de Noviembre de 1973. Que busca regular la contaminación producida por las operaciones normales de los buques durante su navegación.

o mejorar las características deseables al aceite básico o eliminar o minimizar aquellas que puedan ocasionar problemas durante su uso (9) (10) (11).

1.3 EL ACEITE LUBRICANTE USADO

Los aceites pierden sus cualidades lubricantes, pues sufren cambios en sus propiedades físicas y químicas debido a la contaminación con diversos materiales indeseables como el agua, elementos de desgaste de los metales, lodo y hollín, combustibles, ácidos y productos sulfurosos (12) (13) (14). Cuando el aceite alcanza ciertos niveles de contaminación, se hace necesario realizar un cambio parcial o total con el fin de evitar daños en la maquinaria generando un residuo peligroso, el aceite lubricante usado (15).

Según el Manual Técnico para el Manejo de Aceites Lubricantes Usados, se considera que “aceite lubricante usado” es todo aquel aceite lubricante de desecho que por efectos de su utilización, se haya vuelto inadecuado para el uso asignado inicialmente (13) y es considerado un residuo peligroso (según lo establece el Anexo 1, numerales 8 y 9 del Convenio de Basilea²). Metales pesados como el cromo, cadmio, arsénico y plomo, hidrocarburos aromáticos Polinucleares, benceno y algunas veces solventes clorados y PCBs son los compuestos químicos que se encuentran en los aceites usados y cuya presencia producen un efecto directo sobre la salud humana. Por normatividad, todos los aceites que se hayan vuelto inadecuados para el uso que ese les hubiera asignado inicialmente, necesitan una gestión, la cual se refiere a implementar un sistema que integre todas las fases del manejo del aceite, desde su generación, hasta su tratamiento final o regeneración (ver ANEXO A) (16).

Análisis realizados, demuestran que los aceites usados presentan características típicas y composiciones de contaminantes como las señalan en las Tablas 1 y 2.

² Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación, firmado el 22 de marzo de 1989 y ratificado en Colombia por la Ley 253 de enero 9 de 1996.

Tabla 1. Características de los aceites usados en Colombia

CARACTERÍSTICAS	AUTOMOTOR	INDUSTRIAL
Viscosidad a 40°C, SSU	97-120	143-330
Gravedad, °API	19-22	25,7-26,2
Peso Especifico a 15.6°C	0,996-0,8692	0,9002-0,8972
Agua, %Vol.	0,2-33,8	0,1-4,6
Sedimentos, %Vol.	0,1-4,2	0,0
Punto de Ignición, °C	78-220	157-179
Poder Calorífico MJ/Kg	31,560-44,880	40,120-41,840
Fuente: MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA Y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO-ENERGÉTICA. Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión. Bogotá D.C, Octubre de 2001. Pág.: 3.		

Tabla 2. Composición de contaminantes en aceites lubricantes usados.

CONTAMINANTES	CONCENTRACIÓN (ppm)
Cadmio	1,2
Cromo	1,8
Plomo	220
Zinc	640
Cloro Total	900
PCBs	<2
Fuente: MARTÍNEZ, J. Guía para la gestión integral de residuos peligrosos. [En línea]. Editorial Red de Centros. Tomo II, Uruguay 2005. Pág.36 [consultado 4 de Octubre de 2010]. Disponible en < http://www.basel.int/centers/proj_activ/stp_projects/08-03.pdf >	

En Colombia, por lo general los aceites usados son descargados al alcantarillado o quemados sin los mínimos requerimientos para el control ambiental, generando altos niveles de contaminación al agua y al aire que afectan la salud humana (17). Es por esto que tanto para la protección de las personas, como la del medio ambiente, se debe siempre adelantar un procedimiento de reciclaje o re-uso de los aceites usados con el fin de controlar sus contaminantes de tal forma que éste pueda ser utilizado de una forma ambientalmente segura.

Cuando se habla del reciclaje y reutilización de los aceites lubricantes usados se hace referencia al empleo de tratamientos con el fin bien sea de devolverle el uso del producto original o mantener lo más alto posible el valor agregado de un desecho para ser empleado en un uso diferente al original. De esta manera, los aceites lubricantes reciclados incluyen los aceites usados que han sido reprocesados, recuperados o regenerados (18):

- El aceite reprocesado es aquel al que se le han removido los contaminantes insolubles y los productos de oxidación por medio de tratamientos térmicos, filtrados, sedimentación, deshidratación, centrifugación, etc., y el producto obtenido es de calidad similar o equivalente al original.
- El aceite recuperado es aquel al cual se le han separado los sólidos y el contenido de agua por medio de tratamientos de calentamiento, filtración, deshidratación y centrifugación y el producto es utilizado como combustible.
- El aceite regenerado es aquel que es re-refinado para remover sus contaminantes, productos de oxidación y aditivos, con el fin de obtener nuevamente aceites base para la producción de nuevos aceites (19).

1.4 EL ACEITE LUBRICANTE USADO COMO COMBUSTIBLE

En el país se generan grandes volúmenes de aceites usados, provenientes del consumo de diferentes sectores, entre los cuales se encuentran los residuos oleosos provenientes de las sentinas de los buques. Por su elevada capacidad calorífica, el aceite usado se constituye en uno de los residuos con mayor potencial para ser empleado como combustible; por su menor contenido en carbono, azufre y sedimentos, después de ser tratados, generan una contaminación atmosférica menor que los combustibles sólidos (carbón) y tienen mayor rendimiento calórico que otros combustibles industriales convencionales (20). Algunos países como Australia, Estados Unidos, México, Brasil, etc., cuentan con normas que permiten la utilización de los aceites tratados como combustibles, no solo por sus propiedades y características, sino por la necesidad de contar con alternativas energéticas (21). La resolución 1446 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo del 5 de Octubre de 2005³, presenta los requisitos y condiciones para aprovechar el aceite de desecho o usado generado en el país, como combustible; se especifica que el aceite debe ser empleado en mezcla con

³ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO. Resolución 1446 del 5 de Octubre de 2005. Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 415 de 1998, que establece los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho o usado y las condiciones técnicas para la realizar la misma.

otros tipos de combustible (como el fuel Oil), cumpliendo como mínimo con un tratamiento primario (procesos de sedimentación, centrifugación o flotación y filtración) y cumpliendo con las especificaciones mostradas en la Tabla 3. Expuesto lo anterior, para la transformación del aceite usado a energético, es indispensable conocer las propiedades que lo caracterizan y posteriormente, aplicarle el tratamiento tendiente a adecuar las condiciones del aceite a las características propias del proceso de combustión.

El marco normativo para el aprovechamiento y disposición del aceite usado (Normatividad Colombiana) puede ser observado en el ANEXO B.

Tabla 3. Porcentajes para mezclas y límites máximos de contaminantes en aceites usados y tratados.

CONTAMINANTES	Máxima concentración de contaminantes (ppm)	
	Para mezcla hasta del 40%	Para mezcla hasta del 80%
PCBs	15	5
Halógenos orgánicos totales (como HCl)	650	400
Halógenos totales (como HCl)	800	500
Cadmio	2	1
Cromo	8	3
Plomo	50	10
Arsénico	2	1
Níquel	1,5	1
Zinc	120	60
Estaño	5	3
Bario	3	1
Punto de Chispa (°F, valor mínimo)	>170	>170

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 1446 del 5 de Octubre de 2005.

1.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS DESECHOS DE SENTINA

La sustancia de principal interés en el presente trabajo, son los aceites lubricantes usados contenidos dentro de los residuos de sentina, sin embargo, teniendo en cuenta el alto contenido de agua que también está presente en estos residuos se hace necesaria la caracterización tanto de la parte oleosa (aceites usados) como la parte acuosa. Las normas bajo las cuales se realiza la caracterización y una

breve descripción de las propiedades mencionadas pueden ser revisadas en el ANEXO C.

La viscosidad, el índice de viscosidad, la gravedad específica, los °API, el punto de inflamación, el calor de combustión, el índice de basicidad, los metales de desgaste⁴ y el contenido de azufre son las propiedades medidas en el proceso de caracterización de la parte oleosa de los residuos de sentina del presente trabajo y se rigen (en su mayoría) por las normas ASTM⁵.

Dentro de las propiedades mencionadas, son de vital importancia:

- La viscosidad: La cual determinará la facilidad del manejo de los residuos y/o la necesidad de calentamiento en las diferentes etapas de gestión.
- Punto de Inflamación: Es necesario conocer el punto de inflamación de los aceites ante los evidentes riesgos de explosiones incontroladas.
- Calor de Combustión: El cual determinará la eficiencia de los aceites durante los procesos de combustión.
- TBN: Conocer la alcalinidad del aceite, es indispensable para determinar su capacidad de contrarrestar la formación de ácidos y por ende la corrosión de los materiales.
- Los Metales de Desgaste y la presencia de Azufre: principales contaminantes del aceite usado; conocer el contenido de éstos en el aceite determinará tanto su grado de peligrosidad, como si puede ser o no quemado cumpliendo la normatividad legal existente.

La demanda química y biológica de oxígeno, los sólidos suspendidos, el contenido de grasas y aceites, cromo, azufre, níquel y cadmio, son los parámetros de principal interés para conocer el nivel de contaminación de las aguas provenientes de las sentinas y cuya medición (en el presente trabajo) se basa en los “Métodos Estándar para la Evaluación del Agua y Aguas Residuales” (SM).

⁴ METALES DE DESGASTE: Cobre, Hierro, Plomo, Silicio, Cromo, Aluminio, Estaño y Vanadio.

⁵ American Society for Testing and Materials

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

Se tiene como objetivo realizar la caracterización de los residuos de sentina por medio de pruebas que permitan conocer las propiedades tanto de los aceites lubricantes usados (con el fin estudiar su posible aplicación como combustible), como del agua (residuo que debe ser tratado para realizar su posterior vertimiento) que hacen parte de estos residuos. La metodología experimental se desarrolló en cuatro etapas principalmente, tal como puede observarse en el diagrama de bloques (Figura 1). El ANEXO D especifica los requerimientos de seguridad y de tratamiento de residuos manejados durante el desarrollo de cada etapa.

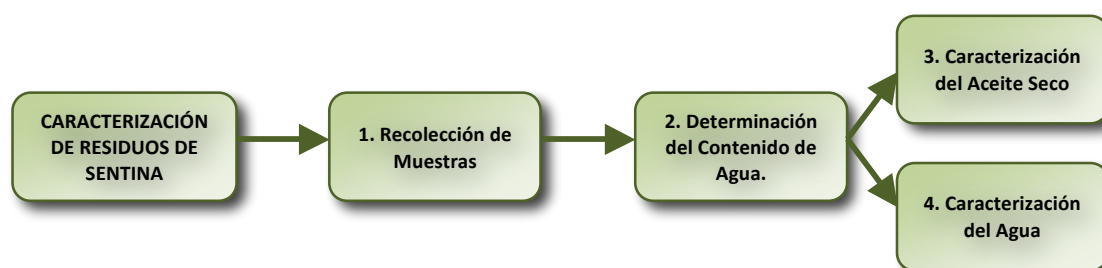


Figura 1. Diagrama de bloques: Metodología

2.1 RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS

La recolección de muestras se realizó directamente de las descargas de los barcos en el Puerto de Cartagena, durante los meses de Marzo y Abril del año 2010, contando con la colaboración de la empresa SERBUCYC Ltda.⁶ En total se recogieron 18 muestras, procedentes de 6 barcos diferentes, lo que indica que hay 3 muestras por barco, cada una de ellas tomadas en diferentes puntos de la descarga (inicio, mitad y final). Así mismo, por cada barco, se recolectó información correspondiente tanto a la embarcación como al tipo de lubricante usado por ella. El procedimiento detallado del proceso de recolección de muestras y la información de cada una de las muestras recolectadas puede ser estudiado en el ANEXO E.

⁶ Serbucyc Ltda. Servicios Para Buques Construcciones Y Consultoría. Empresa portuaria autorizada para la recepción de los residuos de los barcos.

2.2 DETERMINACION DEL CONTENIDO DE AGUA

La determinación del contenido de agua se realizó por medio de tres pruebas:

- Decantación: las muestras se dejaron reposar por un lapso de tres días (72 horas) en probetas de 1000 ml a temperatura ambiente, con el fin de analizar si por diferencia de densidad se logra la separación de las fases.
- Destilación: Teniendo en cuenta que la norma ASTM D-95 (22), sólo cubre la determinación de agua en el rango de 0 a 25% del volumen total de la muestra y esperando encontrar un porcentaje mayor, se realizó una destilación atmosférica y con el fin de que el reporte del contenido de agua tenga mayor confiabilidad, por cada muestra el procedimiento fue hecho por duplicado.

Procedimiento: El balón aforado es conectado a una alargadera de vidrio que tiene como fin evitar el rebose de las muestras por el rompimiento de las emulsiones agua-aceite, la alargadera es conectada a un condensador doble tubo (por medio del codo de destilación) por el cual re-circula agua de enfriamiento. Para evitar pérdidas de calor, el balón, la alargadera y el codo son aislados con fibra de vidrio. Dado el alto contenido de agua en la muestra y la dificultad de romper las emulsiones, se adicionan pedacitos de cerámica al balón aforado para hacer más fácil la separación y al mismo tiempo evitar la sobre ebullición o ebullición desbordante por expansión del agua; Se adicionan 300 ml de muestra al balón y se enciende la manta asegurando un calentamiento lento, aumentando la temperatura cada media hora iniciando en 60°C hasta llegar a los 100°C aproximadamente, donde se empiezan a observar las primeras gotas de destilado, se deja que el flujo de destilación se haga constante y se mantiene la temperatura, la cual empieza a aumentar hasta que no hay mas recuperación de líquidos. Se reportan resultados en cuanto a cantidad de agua destilada, temperaturas iniciales y finales, cantidad de aceite “seco” y tiempo de duración de la prueba.

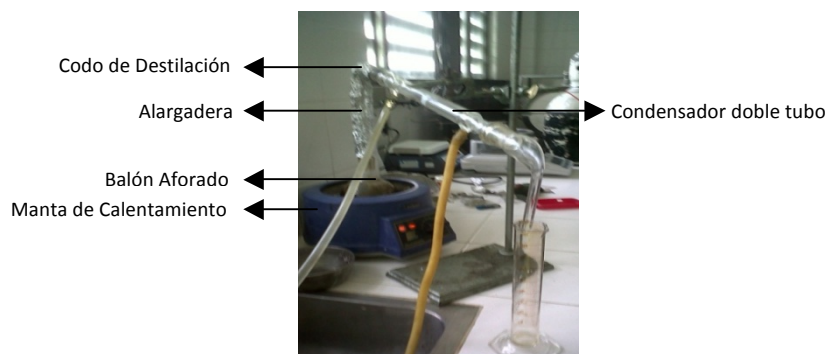


Figura 2. Montaje pruebas de destilación

Fuente: El autor

- Secado en horno: Para garantizar que el contenido de agua fue totalmente separado del aceite, el aceite resultante de la destilación atmosférica es secado en un horno Blinder 500 a una temperatura de 110°C durante 24 horas. Por diferencia de peso se determina la cantidad de agua evaporada.

2.3 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE

Después de separado el contenido de agua de cada muestra, los “aceites secos” de un mismo barco se mezclaron, dando como resultado 6 muestras de aceites secos de diferentes barcos, las cuales fue sometidas a diferentes pruebas para ser caracterizadas. Algunas de las pruebas fueron realizadas en laboratorios externos a la Universidad y en estos casos, solo tres muestras fueron analizadas. La información de las pruebas realizadas puede observarse en el ANEXO F.

Viscosidad Cinemática e Índice De Viscosidad: La determinación de las viscosidades a 40° y 100 ° C, se realizó con el “Método de Prueba Estándar para Viscosidad Cinemática de Líquidos Transparentes y Opacos” ASTM D 445 (23). Basados en los resultados obtenidos, se determinó el índice de viscosidad por medio de la “Práctica Estándar para Calcular el Índice de viscosidad a partir de la Viscosidad Cinemática a 40 y 100°C” ASTM D 2270 (24)⁷.

Gravedad Específica y °API: La determinación de la gravedad específica se realizó con base en la medición de la densidad por medio de un picnómetro; teniendo la densidad y la temperatura a la cual ésta fue determinada, con las tablas

encontradas en el libro “Petroleum Measurement tables” (25) se determina la gravedad específica. Teniendo la gravedad específica de la muestra a una temperatura dada, se calcularon los grados API así:

$$^{\circ}API = \left(\frac{141,5}{GE} \right) - 131,5$$

Donde GE hace referencia a la gravedad específica.

Punto De Inflamación: La determinación del punto de inflamación se realizó con el “Método de Prueba Estándar para la Determinación del Punto de Inflamación y de Llama por Probador Cleveland de Copa Abierta” ASTM D 92 (26)⁷.

Calor De Combustión: La determinación del calor de combustión fue realizada mediante dos métodos:

- Método gráfico: Con base en la gravedad específica o los °API calculados y por medio de la gráfica “Calor de Combustión en Combustibles” (27) se determinó el calor de combustión de cada muestra.
- Por norma: La determinación del calor de combustión se realizó con el “Método de Prueba Estándar para la determinación del Calor de Combustión en Hidrocarburos Líquidos Por Calorímetro de Bomba” ASTM D 240 (28). Con los resultados obtenidos mediante esta prueba, se pretende corroborar la exactitud del método gráfico nombrado anteriormente⁸.

Índice De Basicidad: La determinación del índice de Basicidad TBN se realizó con el “Método de Prueba Estándar para El Número Base de Productos Derivados del Petróleo por Titulación Potenciométrica del ácido perclórico” ASTM D2896 (29)⁹.

⁷ La determinación de la viscosidad cinemática, el índice de viscosidad y el punto de inflamación fueron realizadas en los laboratorios certificados de la empresa *C.I PROQUIMSA LTDA.* (Barrancabermeja), con el fin de garantizar el cumplimiento de la norma citada en cada una de éstas pruebas.

⁸ Para la determinación del calor de combustión o Poder calorífico fueron enviadas tres muestras al *Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia* (Bogotá), con el fin de garantizar el cumplimiento de la norma citada.

⁹ Para la determinación del índice de basicidad y el contenido de metales de desgaste, fueron enviadas tres muestras a la empresa *CYAT Consultoría y Análisis Químicos* (Bogotá), con el fin de garantizar el cumplimiento de la norma citada

Contenido De Metales De Desgaste: La determinación del contenido de metales se realizó con el “Método de Prueba Estándar para la Determinación de Metales de Desgaste y Contaminantes de los Aceites Lubricantes Usados o Fluidos Hidráulicos Usados por la Rotación de Discos Electrodo por Espectrometría de Emisión Atómica” ASTM D 6595 (30)⁹.

Determinación Del Contenido De Azufre¹⁰: La determinación del contenido de azufre se determinó con el “Método de Prueba Estándar para la determinación del Contenido de Azufre en el petróleo y sus derivados por espectroscopia de Fluorescencia con Energía Dispersiva de Rayos X” ASTM D 4294 (31).

2.4 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA¹¹

El agua no es la sustancia de principal interés dentro del presente trabajo pero conocer sus propiedades se hace necesario teniendo en cuenta que ésta hace parte de los residuos de sentina y que al buscar el aprovechamiento energético de los aceites también contenidos en estos residuos, el agua representaría un desecho el cual debe ser caracterizado y tratado con el fin de realizar su vertimiento y cumplir con las normas medioambientales.

Mediante un proceso de decantación (durante 72 horas) de los residuos de sentina, se obtuvieron tres muestras de agua, las cuales fueron sometidas a diferentes métodos de prueba basados estrictamente en los “Métodos Estándar para el examen de aguas y aguas residuales (SM) (32). Dada la importancia secundaria del agua dentro del presente trabajo, no se realiza una profunda descripción de su proceso de caracterización. Detalles básicos de éste proceso pueden ser observados en el ANEXO G.

¹⁰Para la determinación del contenido de azufre, fueron enviadas tres muestras al *Laboratorio de Caracterización y Evaluación de Crudos, del Instituto Colombiano de Petróleo, ECOPETROL (Piedecuesta)*, con el fin de garantizar el cumplimiento de la norma citada.

¹¹ Para la caracterización del agua, fueron enviadas tres muestras al *Laboratorio Químico de Consultas Industriales –UIS-*, con el fin de garantizar el cumplimiento de los métodos establecidos para cada una de las pruebas.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se encuentran los resultados obtenidos de la caracterización de los residuos de sentina, su análisis y una propuesta de tratamiento teniendo en cuenta los resultados obtenidos.

3.1 CONTENIDO DE AGUA

3.1.1 Pruebas de decantación. De las 18 muestras que fueron dejadas en reposo, solo 3 mostraron separación de la fase acuosa de la fase oleosa tal como puede observarse en la Figura 3; esto se debe principalmente a que el forma emulsiones con el aceite y la diferencia de densidades no es suficiente para lograr una separación de las fases. Mejores resultados de este tipo de prueba pueden obtenerse si se aplica calor durante el proceso de decantación.

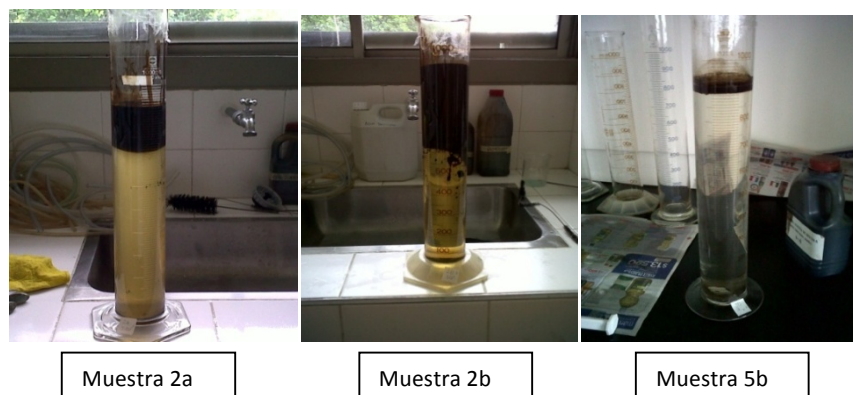


Figura 3. Resultados prueba de decantación

Fuente: El autor.

El contenido de agua determinado de esta manera para las muestras 2a, 2b y 5c es del 70%, 57% y 95% respectivamente, contenidos bastante altos, teniendo en cuenta que la sustancia de principal interés es el aceite; sin embargo, se hace indispensable realizar la prueba de destilación con el fin de romper las emulsiones formadas y determinar el contenido de agua en todas las muestras.

3.1.2 Destilación Atmosférica y secado en horno. La Figura 4 representa el contenido de agua en las muestras analizadas, como puede observarse, en su mayoría, el contenido de agua es alto, superando el 50% del total de la muestra, la

cual antes de la destilación presenta una apariencia homogénea, por lo que puede asegurarse que el agua se encuentra formando emulsiones y cuya ruptura implica un calentamiento lento como el realizado en el proceso de destilación atmosférica. Las muestras tomadas al inicio de la descarga (nombradas “A”) presentan un mayor contenido de agua, dado que en las sentinas, ésta puede irse decantando de tal forma que al iniciar la descarga sea la primera en salir; en la Tabla H. 1 (ANEXO H) pueden observarse los resultados detallados de esta prueba.

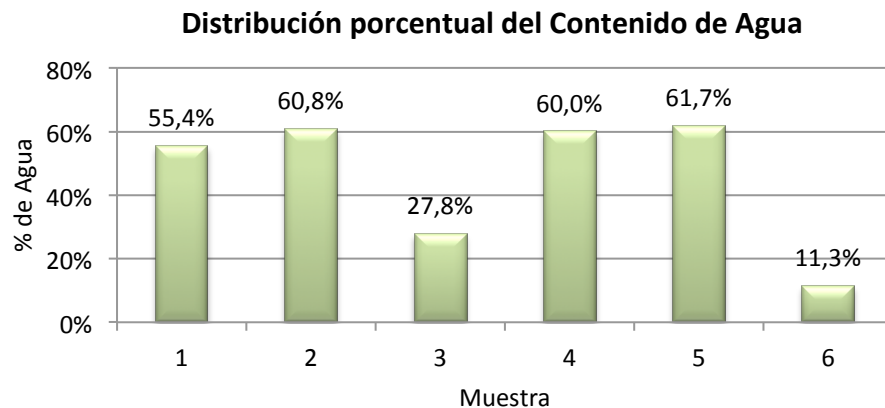


Figura 4. Distribución porcentual del Contenido de Agua

La variación encontrada en el contenido de agua se debe a que cada muestra proviene de barcos diferentes, y los mecanismos de recolección y la cantidad de agua generada dentro de estos no necesariamente es igual. Por otro lado, existen barcos que cuentan con separadores de sentinas, los cuales realizan la separación agua-aceite y el agua que no excede 15 ppm de hidrocarburos se vierte directamente al mar, ó, pensando de manera negativa, puede considerarse la posibilidad de que estos barcos hayan realizado una descarga ilegal al mar (con el fin de disminuir el costo de la descarga) y que el agua por diferencia de densidades fuera el compuesto descargado en mayor proporción.

Durante el proceso de destilación, se encontró que junto con el agua, se destila otros elementos volátiles (un pequeño porcentaje de combustible) los cuales también podrían ser aprovechados (Figura 5).

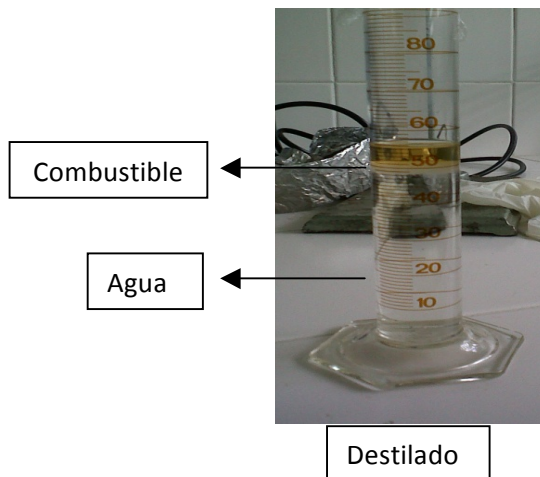


Figura 5. Separación resultante de la destilación

Fuente: El autor

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE SECO

En la Tabla H. 2 y la Tabla H. 3 (ANEXO H) se pueden observar los resultados obtenidos de las diferentes pruebas de realizadas a las muestras de aceite seco, resultados que son analizados a continuación.

3.2.1 Viscosidad. La Figura 6 representa las viscosidades de los aceites secos a 40 y 100°C; como puede observarse, existe una amplia variabilidad debido a que las muestras no provienen de un mismo aceite lubricante, de hecho, cada una, es una mezcla de diferentes aceites y el grado de degradación de éstos depende tanto de su formulación inicial como del estado de la máquina en la cual fueron empleados. Teniendo en cuenta las propiedades de los aceites de los cuales provienen las muestras analizadas, Tabla E.2 (ANEXO E), se observa un aumento bastante brusco en la viscosidad, el cual es causado por los productos formados por la oxidación (lodos y lacas), las polimerizaciones, la degradación de los aditivos mejoradores de la viscosidad y la contaminación del aceite con agua, espumas y otros aceites de mayor viscosidad (33).

3.2.2 Punto de inflamación. En la Figura 7 se encuentran los puntos de inflamación de los aceites secos, los cuales van desde lo 224°C hasta los 236°C; el conocimiento de estas temperaturas es importante para el manejo de los

aceites, tanto para su almacenamiento como para los procesos de operación durante su tratamiento; En la tabla E.2 (ANEXO E) se encuentran las principales propiedades de los aceites de los cuales provienen las muestras analizadas; en cuanto al punto de inflamación se encuentran variaciones ($\pm 30^{\circ}\text{C}$), las cuales son el reflejo de la contaminación bien sea por combustibles y otros aceites de distintas propiedades (en el caso de la disminución), como por agua, residuos carbonosos y otros aceites de distintas propiedades (en el caso del aumento) (33).

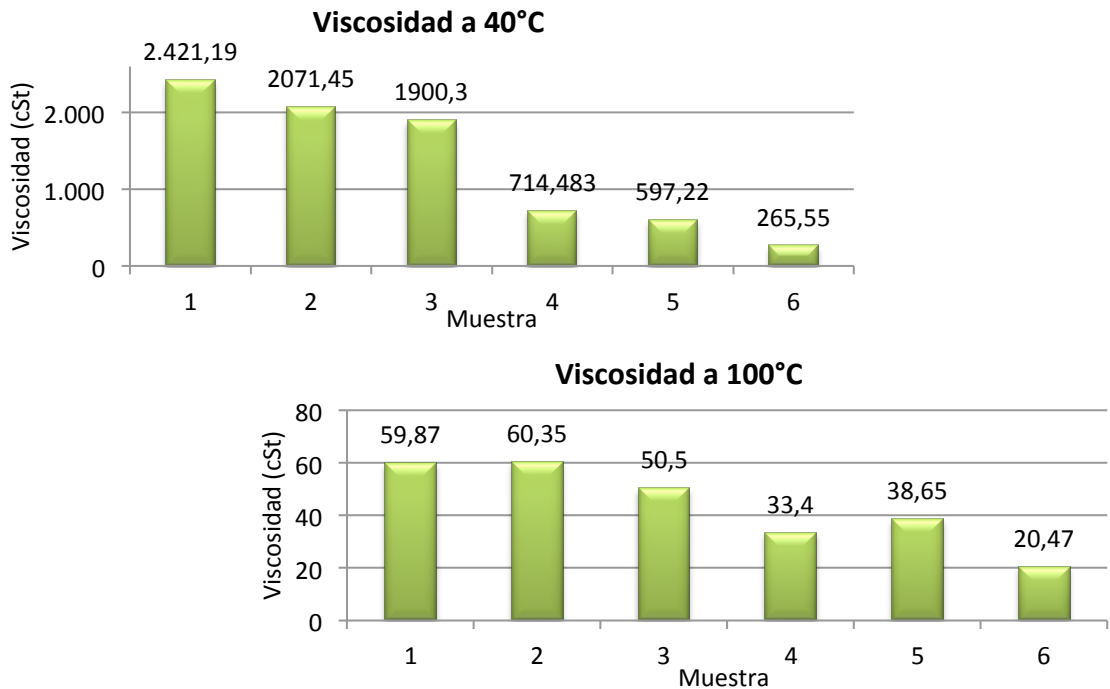


Figura 6. Viscosidad de los Aceites Secos a 40 y 100°C

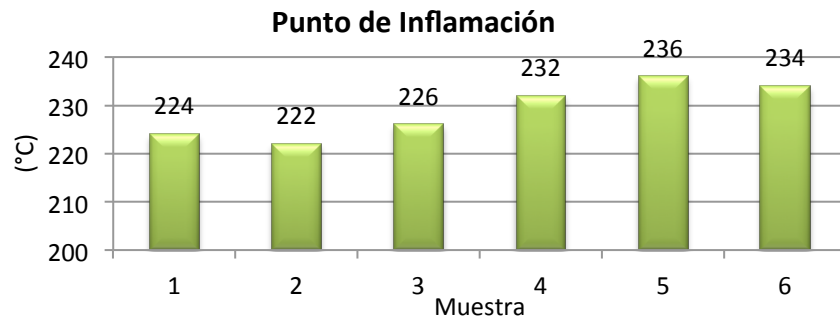


Figura 7. Punto de Inflación de los aceites secos.

3.2.3 Calor de combustión. El calor de combustión es quizá la característica de principal interés teniendo en cuenta la intención de emplear los aceites usados como combustibles. En la Figura 8 puede observarse que el calor de combustión de los aceites usados supera los 43.000 kJ/kg, valores significativos en cuanto a la eficiencia que se puede obtener al ser empleados como combustibles alternos.

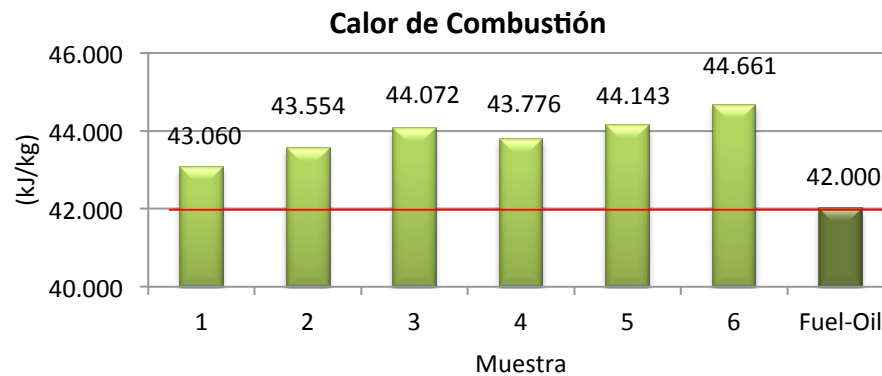


Figura 8. Calor de combustión de los aceites secos.

Realizando una comparación del calor de combustión presentado por los aceites secos con los presentados por diversos materiales (34), resulta interesante apreciar como el calor de combustión de los aceites usados es semejante de la gasolina y el petróleo crudo (47 MJ/kg), superior al del fuel-oil o combustóleo (42 MJ/kg) (35) y superior a la mayoría de los materiales que pueden ser empleados como combustible alternativo en procesos térmicos, incluso superando el carbón empleado principalmente en los hornos de fabricación de cemento (30 MJ/kg). Lo anterior indica, que los aceites usados en términos de eficiencia pueden ser empleados como combustible alternativo.

3.2.4 Reserva alcalina (TBN). Basados en que la reserva alcalina es definida como la capacidad de neutralizar los ácidos procedentes de la combustión y la oxidación del aceite, es importante contar con valores superiores a 1 de este parámetro en los aceites usados, con el fin de que efectos de la corrosión ocasionados por los mismos aceites puedan ser controlados. Como puede observarse en la Figura 9, la reserva alcalina de las tres muestras analizadas no presenta una amplia variabilidad entre si y sus valores son superiores a los 4 mg

de KOH/g. Sin embargo, si comparamos la variabilidad de la reserva alcalina con respecto a los aceites lubricantes de los cuales proceden las muestras, si existe una disminución de esta propiedad, la cual es consecuencia de la contaminación de los aceites con combustibles, agua y/o mezclas de aceites con diferentes TBN.

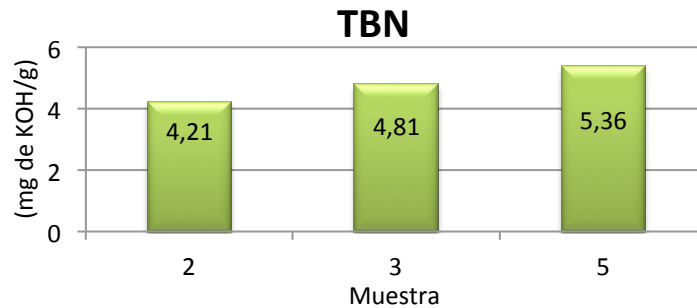


Figura 9. Reserva alcalina de los aceites secos.

3.2.5 Metales de desgaste. En la Figura 10 puede observarse el contenido de metales de desgaste en tres muestras diferentes de aceite seco. Los metales en los aceites usados dependen tanto de los aditivos de aceite inicial como del estado de las máquinas en los cuales fueron empleados, aspectos que son diferentes en cada muestra analizada, lo cual explica la variabilidad encontrada. Dentro de los metales de desgaste analizados, el cadmio y el cromo constituyen los de mayor peligrosidad pues son potencialmente cancerígenos; estudios realizados por la EPA (Agencia de Protección Ambiental) sobre las alternativas de reglamentación del aceite lubricante usado, afirman que más de 3000 tipos de cáncer han sido detectados como resultado de la absorción de estos metales y sus compuestos durante la quema de combustibles sin previo tratamiento (13). Aunque en la literatura no se reportan concentraciones establecidas de metales en aceites lubricantes usados dada la amplia variabilidad que puede encontrarse según su aplicación, en la tabla 3 se encuentran las concentraciones permitidas del Plomo (50 ppm), el cromo (8 ppm), el estaño (5 ppm) y el cadmio (2 ppm) para utilizar los aceites usados como combustibles (en mezcla con un combustible tradicional) y según los resultados obtenidos, se analiza que estos cuatro tipos de metales se encuentran por debajo de las concentraciones permitidas, lo cual garantizaría el cumplimiento de la normatividad legal al emplearlos como combustibles.

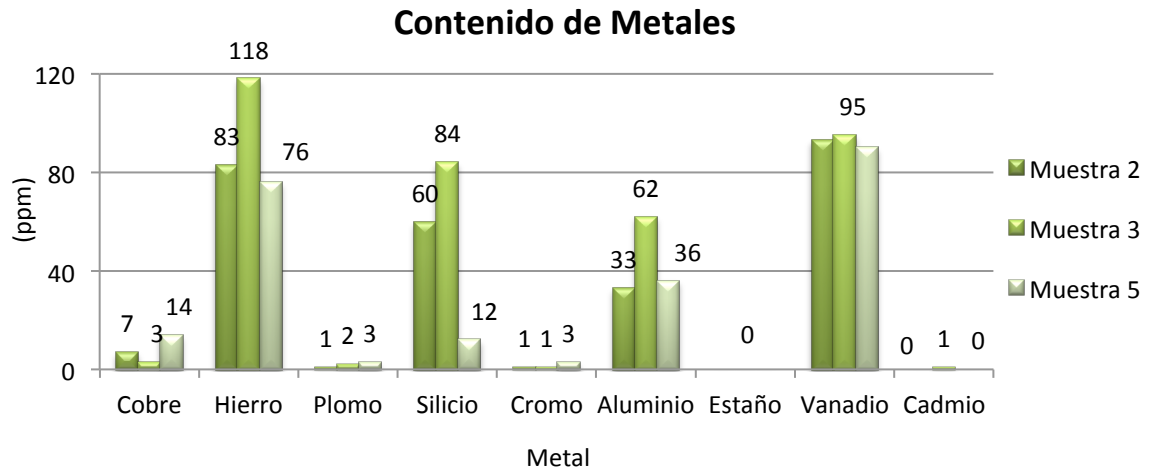


Figura 10. Contenido de metales de desgaste en los aceites secos.

3.2.6 Contenido de azufre. En la Figura 11 puede observarse el contenido de azufre encontrado en tres muestras diferentes de aceite seco analizadas.

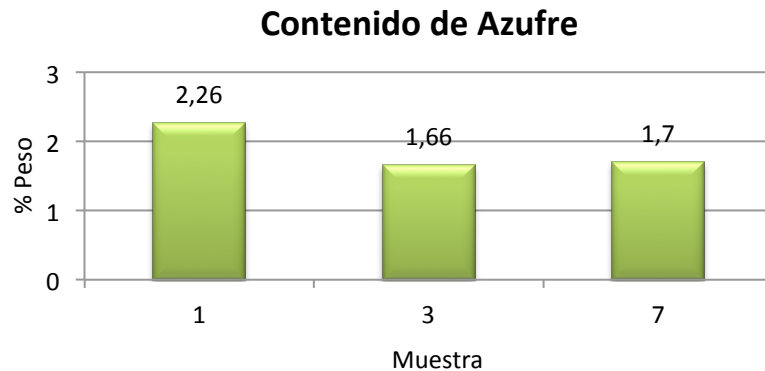


Figura 11. Contenido azufre en los aceites secos.

Conocer el contenido de azufre es importante, ya que éste es un elemento que en estado gaseoso causa daño; durante la combustión de elementos que contienen azufre se libera al aire dióxido de azufre y material particulado muy perjudiciales para la salud; así mismo, el dióxido de azufre es un gas que al mezclarse con el agua, se convierte en ácido sulfúrico, causando la lluvia y neblina ácida que afectan al medio ambiente. El análisis del contenido de azufre obtenido, se encuentra en el numeral 3.3 (El aceite como combustible alterno).

3.3 EL ACEITE COMO COMBUSTIBLE ALTERNO

Industrialmente hablando, una planta de tratamiento de residuos de sentina, procesará los residuos provenientes de diferentes buques, los cuales serán mezclados formando una sola corriente cuyas propiedades estarán relacionadas con las propiedades individuales de los aceites que lo componen. Con el fin de tener una aproximación a las características que tendría esta mezcla de aceites, los resultados obtenidos de las diferentes muestras fueron promediados obteniendo las propiedades que pueden observarse en la Tabla 4.

El calor de combustión del aceite resultante demuestra su eficiencia para ser empleado como combustible (siendo éste superior al reportado por el combustóleo y muy cercano al del petróleo y la gasolina). Con respecto a la viscosidad, podría decirse que se cuenta con un combustible residual pesado (también denominado Residual Fuel Oil, Fuel Oil No. 5 o 6, Bunker o combustóleo) que puede quemarse en un horno o caldera para la generación de calor o utilizarse en un motor para la generación de energía.

Tabla 4. Propiedades generales del aceite usado (Promedio)

PROPIEDAD	NORMA ASTM	Resultado
Viscosidad a 40°C (cSt)	D 445	1.328,65
Viscosidad a 100 °C (cSt)	D 445	47,87
Índice de Viscosidad	D 2270	70,82
Gravedad Específica		0,961
°API		15,86
Calor de Combustión (MJ/Kg)	D 240	44,968
Punto de Inflamación (°C)	D 92	231
TBN (mg de KOH/g)	D2896	4,8
Azufre (% Peso)	D-4294	1,87
Cobre (ppm)	ASTM D-6595	8,00
Hierro (ppm)	ASTM D-6595	92,33
Plomo (ppm)	ASTM D-6595	2,00
Silicio (ppm)	ASTM D-6595	52,00
Cromo (ppm)	ASTM D-6595	1,67
Aluminio (ppm)	ASTM D-6595	43,67
Estaño (ppm)	ASTM D-6595	0,00
Vanadio (ppm)	ASTM D-6595	92,67
Cadmio (ppm)	ASTM D-6595	0,33
Fuente: El autor		

El combustible puede ser empleado para su quema en hornos de clinker en la fabricación de cemento sin preocupaciones por el contenido de metales o del azufre ya que la naturaleza alcalina de la materia prima existente en la producción de cemento actúa como trampa para los óxidos de azufre reduciendo las emisiones atmosféricas de estos gases y las cenizas resultantes de los materiales incombustibles como los metales pesados contenidos, son atrapados por el clinker y terminan siendo parte de la materia prima (14). Otra opción, es el empleo de los aceites como combustible marino, en cuyo caso, por su alta viscosidad requiere ser calentado antes de su uso para que pueda ser bombeado desde el tanque de combustible o ser mezclado con combustibles livianos (fuel Oil No. 2) para disminuir su viscosidad. Según las especificaciones presentadas en la Resolución 898 de 1995 del Ministerio del Medio Ambiente, el combustóleo (Fuel Oil No. 6) que se distribuya en el país para consumo a nivel nacional en calderas y hornos no puede contener azufre mayor al 1% en peso, sin embargo, para ser empleado en barcos y con base en las especificaciones de combustibles marinos ISO 8217 (36), dentro de los requerimientos para los combustibles residuales el contenido de azufre máximo es de 3.5 a 4.5 % peso, contenido superior al presentado por el aceite estudiado.

3.4 RESULTADOS CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

Dada la importancia secundaria del agua en el desarrollo de este proyecto, los resultados de los análisis realizados a tres muestras de agua y su análisis se encuentran en el ANEXO I.

3.5 PROPUESTA BÁSICA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE SENTINA

A partir de la caracterización que se llevó a cabo de los residuos de sentina, se demostró que los aceites lubricantes usados, pueden ser empleados como combustibles, con algunas propiedades diferentes a las encontradas en los combustibles tradicionales, las cuales aun se encuentran en un rango aceptable dentro del mercado. A demás, dada la contaminación que se está generando a

nivel mundial por las descargas de sentina ilegales y el creciente interés por encontrar fuentes de energía alternativa, el tratamiento a los residuos de sentina abarcaría una posible solución a estos dos problemas. Actualmente, Colombia presenta una desventaja en cuanto a la recepción de las descargas de sentinas de los buques en los diferentes puertos, comparados con otros países como Brasil y países Europeos; mientras que en Colombia, un barco debe pagar para realizar su descarga de sentina, en países en los cuales los tratamientos a estos residuos han demostrado ser efectivos y rentables, se les paga a los barcos por su descarga. Teniendo en cuenta esto, el proyecto futuro de las partes interesadas en el desarrollo de esta investigación, es realizar el montaje de una planta de tratamiento de residuos de sentina en la Ciudad de Cartagena-Colombia. Con base en la caracterización realizada y el comportamiento de los residuos de sentina durante las diferentes pruebas, para la utilización de los aceites como combustibles, se propone un tratamiento mínimo que consiste en la separación del agua presente en los residuos y un proceso de eliminación de partículas pesadas, así, el proceso podría resumirse como se muestra en la Figura 12.

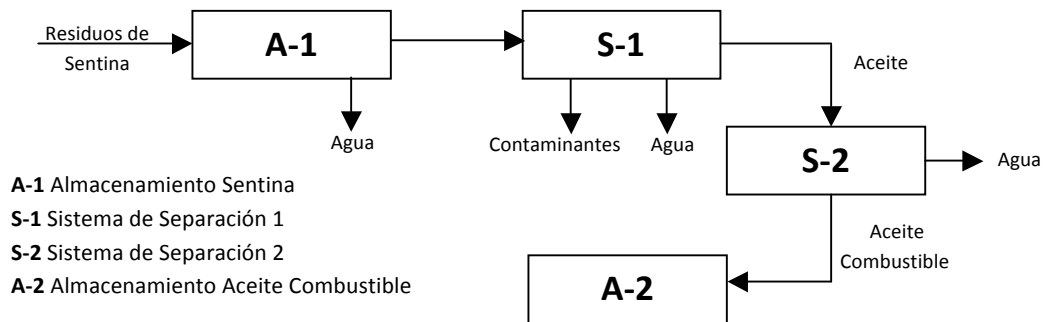


Figura 12. Diagrama de Bloques Tratamiento de Sentinas

Fuente: El autor

Los residuos de sentina se transportan a la planta de tratamiento mediante carros cisternas y se reciben en un tanque de almacenamiento (A-1), en el cual, parte del agua que se encuentra de manera libre dentro de los residuos se decanta por diferencia de densidades. La primera etapa del proceso consiste en realizar una centrifugación (S-1) con el fin de eliminar posibles partículas sólidas presentes y

remover la mayor cantidad de agua posible, seguido a esto, se realiza una segunda separación (S-2) que consiste en un calentamiento del aceite; al aumentar la temperatura, se aumenta la frecuencia de choque entre las gotas y se disminuye la viscosidad de la fase continua (disminuyendo la resistencia al movimiento de las gotas que deben chocar) lo cual permite el crecimiento de las gotas hasta un tamaño que logra inestabilizar la emulsión y el agua logra separarse por decantación (37), con estos dos procesos, el aceite que ya se encuentra libre de agua y de contaminantes, es apto para ser empleado como combustible alternativo y es almacenado en un tanque (A-2) para su posterior comercialización. Del proceso descrito, resultan dos tipos de desechos, el agua y los lodos de centrifugación. El agua deberá ser tratada para poder realizar su vertimiento (ANEXO I) y la mejor forma de disposición de los lodos deberá ser estudiada teniendo en cuenta cuatro opciones posibles propuestas por el Manual de Normas y Procedimientos para la Gestión de Aceites Usados (38), incineración, encapsulamiento en el clinker durante el proceso de fabricación de cemento, vitrificación o ceramizado o llenante en el proceso de elaboración de capas asfálticas de rodadura.

Teniendo en cuenta el comportamiento de las descargas de sentina observado durante la etapa de recolección de muestras y los datos suministrados por SERBUCYC Ltda.¹², las descargas de los barcos no siguen ningún patrón ni de frecuencia ni de cantidad, sin embargo, se puede decir que por semana hay mínimo una descarga de 40 a 60 m³. La temperatura de los residuos de sentina al momento de ser entregados en la planta de tratamiento es de entre 30 y 40°C (dado la temperatura ambiente de Cartagena) y es la temperatura a la cual permanecen hasta la etapa de calentamiento, en la cual, son llevados a los 90°C. Para los tiempos de retención, se siguen los recomendados durante los tratamientos de deshidratación de crudos (37); así, se recomienda dejar en reposo los residuos de sentina en el tanque de almacenamiento, de 12 a 48 horas, para

¹² Serbucyc Ltda. Servicios Para Buques Construcciones Y Consultoría. Empresa portuaria autorizada para la recepción de los residuos de los barcos.

favorecer la decantación del agua libre y el tanque de calentamiento, de 8 a 24 horas para la inestabilización de la emulsión y posterior decantación del agua. La separación realizada por la centrífuga se da en continuo y su capacidad al igual que la capacidad de las bombas de transferencia se recomiendan de 5000 a 10000 L/h para que el tiempo de transporte no sea superior al establecido en ninguno de los equipos. La Figura 13 representa el esquema de la planta de tratamiento de sentinas propuesta y a continuación se hace una breve descripción de los elementos de dicha propuesta.

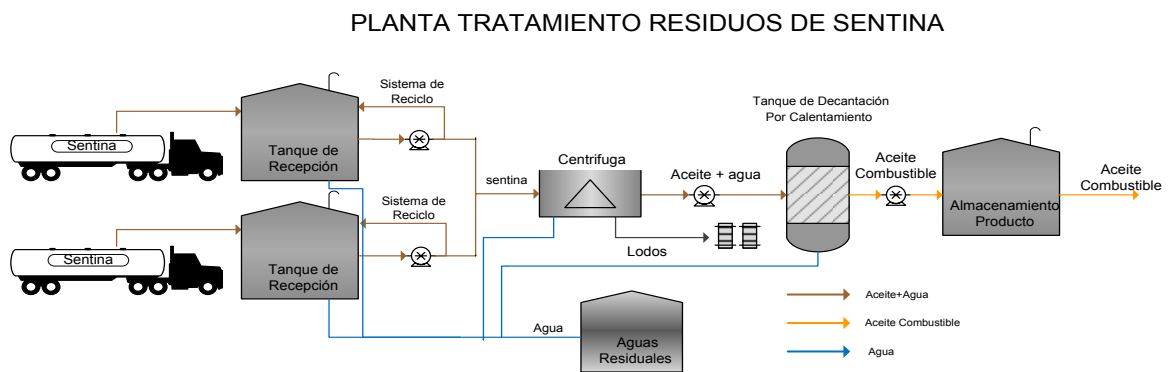


Figura 13. Propuesta de planta de tratamiento de sentinas.

Fuente: El autor

Tanques de recepción: tanques tipo atmosféricos de techo cónico, diseñados con base a la norma API-650, (Welded Tanks for Oil Storage) fabricados acero inoxidable; deben contar como mínimo con un sistema de venteo tipo cuello de ganso (que evite la sobrepresión del tanque) y un medidor de nivel (13). Se recomiendan dos tanques con capacidad de 100 m³ cada uno, con el fin de dejar reposar el aceite de una descarga durante 36 horas, sin que sea interrumpido este reposo por una siguiente descarga para favorecer la decantación del agua libre (del 5 al 10% del contenido de agua total); que cuenten con un filtro en la entrada, para eliminar partículas sólidas de tamaño considerable, con un sistema de reciclo que permita la homogenización de los aceites y salidas en los fondos para retirar el agua decantada. Durante la determinación de sus dimensiones, se recomienda darle la mayor altura posible para favorecer la decantación del agua libre.

Tanque de Almacenamiento del producto y de Aguas residuales: tanques tipo atmosféricos de techo cónico, igualmente diseñados con base en la norma API-650, fabricados en acero inoxidable. Se recomienda cada tanque con capacidad de 100 m³, teniendo en cuenta que el contenido de agua y aceite en la sentina es de aproximadamente 50%.

Centrífuga: Equipo especializado para la extracción de los lodos y del agua libre dentro de la mezcla con una capacidad de 5000 a 10000 L/h. En este equipo se busca remover la mayor cantidad posible de agua con el fin de reducir costos en el posterior calentamiento (un calentador requiere de 350 Btu para calentar un barril de agua en 1°F, pero solamente requiere 150 Btu para calentar 1 barril de crudo en 1°F (37)). Los lodos extraídos (no mayores al 5% en volumen) se almacenan en tambores para posteriormente darles una adecuada gestión.

Tanque de decantación por calentamiento: tanque con un serpentín exterior para la circulación de vapor (proveniente de una caldera) que permita el calentamiento del aceite hasta 90°C para favorecer el rompimiento de las emulsiones y la decantación posterior del agua. Debe ser fabricado igualmente, con base a la norma API-650, (Welded Tanks for Oil Storage), en acero inoxidable, con un agitador de paletas para promover la transferencia de calor durante el calentamiento, sin promover la formación de emulsión. Se recomienda una capacidad de 50 m³ y se estima un tiempo de calentamiento de 2 horas y una retención de 24 horas, con base en los tiempos encontrados en la literatura para el rompimiento de emulsión agua-crudo (37).

Bombas: Se recomiendan bombas de desplazamiento positivo, con variador de frecuencia y caudal de 5000 a 10000 m³ con protecciones anti-explosión.

Con base en los tiempos de retención y las capacidades de los equipos mencionados, la máxima capacidad de procesamiento por lote es de 60 m³ (restringida por la capacidad del tanque de calentamiento) y tardaría 76 horas, tal como puede observarse en el diagrama de Gantt (Figura 14), operando 6 días por

semana, realizando dos lotes por semana, la capacidad máxima de la planta sería de 480 m³, operando los equipos a un 50% de su capacidad, se procesarían mensualmente 240 m³; lo anterior sin considerar el posible traslape de la etapa de almacenamiento, la cual podría iniciar desde la hora 40 sin alterar las 24 horas de decantación en el tanque de calentamiento, reduciendo en 36 horas la duración de procesamiento de un segundo lote.

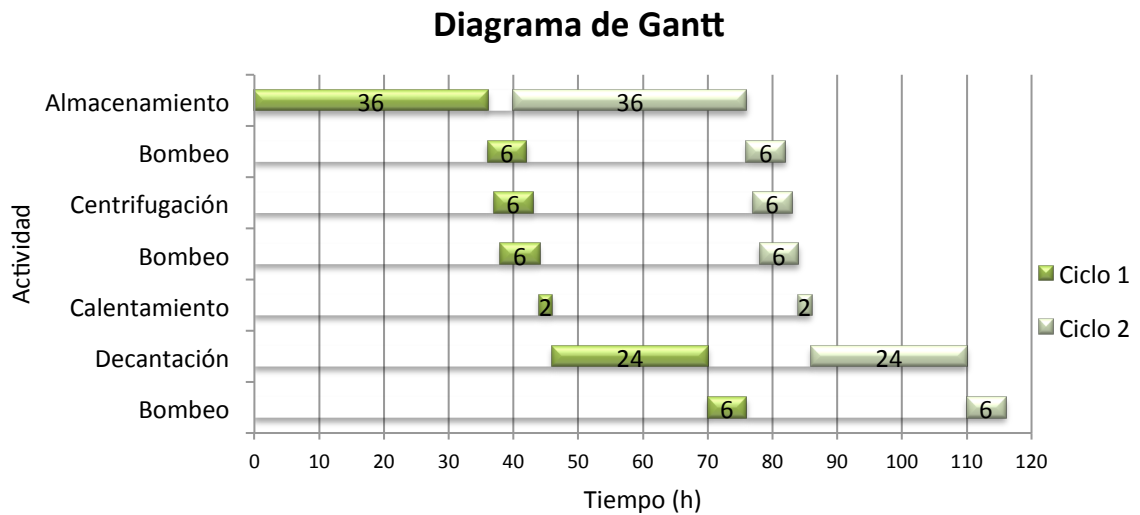


Figura 14. Diagrama de Gantt.

Fuente: El autor

Con base a las condiciones mencionadas, para tener una estimación en los costos de los equipos se solicitó una cotización a una empresa especializada, Industrias Ricaurte Ltda. (Ver ANEXO J), la cual incluye todos los accesorios, tubería e instalación y cuyos costos se relacionan en la siguiente tabla.

Tabla 5. Costos de los equipos.

EQUIPO	CANTIDAD	COSTO	COSTO TOTAL
Tanque de Recepción	2	270'000.000	540'000.000
Tanque Almacenamiento Producto	1	256'000.000	256'000.000
Tanque Almacenamiento aguas	1	256'000.000	256'000.000
Centrifuga	1	75'000.000	75'000.000
Tanque de Calentamiento	1	210'000.000	210'000.000
Caldera	1	95'000.000	95'000.000
Tuberías, bombas, accesorios, válvulas y filtros		89'800.000	89'800.000
GRAN TOTAL			1.521'800.000

Fuente: El autor. Datos suministrados por Industrias Ricaurte Ltda.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las propiedades físicas y químicas de los aceites provenientes de las sentinas presentan una amplia variación con respecto a las propiedades de los aceites lubricantes de los cuales provienen; variaciones causadas principalmente por su contaminación con agua, combustibles, productos de oxidación y por la degradación de sus aditivos.

El calor de combustión presentado por los aceites usados provenientes de los aceites de sentina, muestran claramente su alta eficiencia para ser empleados como combustibles alternativos, siendo éste semejante al de la gasolina y el petróleo crudo y superior al del combustóleo y el carbón mineral.

Aunque las propiedades del aceite combustible varía con respecto a las propiedades de los combustibles tradicionales y el contenido de azufre no se encuentra dentro del rango permitido para ser empleados a nivel nacional en calderas y hornos, si puede ser empleado en barcos cumpliendo la normatividad legal vigente, teniendo impactos ambientalmente positivos por la disminución de la contaminación de los océanos por las descargas ilegales y la generación de una fuente de energía alterna.

Para el empleo de los aceites lubricantes usados como combustible alterno, se propone un tratamiento básico para las sentinas, que consiste en tres etapas, la decantación para la eliminación del agua libre, la centrifugación para la remoción de sólidos y agua y el calentamiento para la separación del agua emulsionada.

Se recomienda realizar mayores estudios para el tratamiento de los residuos de sentina, evaluando la posibilidad del empleo de sustancias químicas rompedoras de emulsiones, como las empleadas en la deshidratación del crudo, así como realizar análisis financieros para evaluar la viabilidad económica del proceso de tratamiento de sentinas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **CATAÑO, ALIS.** El Convenio MARPOL 73/78: Un estudio detallado. Ministerio de Ambiente del Reino Unido. [En línea] <http://www.derechomaritimo.info/pagina/marpol.htm>, 18 de Octubre de 2004. [Citado el: 8 de Julio de 2010.]
2. **OCEANA.** EL VERTIDO DE HIDROCARBUROS DESDE BUQUES A LOS MARES Y OCEANOS DE EUROPA. La otra cara de las Mareas Negras. Noviembre de 2003. [En línea] <http://eu.oceana.org/sites/default/files/reports/oil-report-spanish.pdf>. [Citado el: 5 de Julio de 2010.]
3. —. Reportaje: Vertidos Rutinarios de Hidrocarburos. [En línea] <http://eu.oceana.org/es/eu/prensa-e-informes/reportajes/vertidos-de-hidrocarburos>. [Citado el: 8 de Julio de 2010.]
4. **SEJO GARCÍA, M^a.A.; IGLESIAS RIVERA, M^a.M.; MUÑOZ CAMACHO, E. y CASTAÑO, S. F.** Estado actual de la gestión de residuos marpol y su contribución a la prevención de la contaminación marina. Coruña-España : Residuos: Revista Técnica, 2007. págs. 72-81. Vol. 17. No. 96. ISSN 1131-9526.
5. **ENCICLOPEDIA WIKIPEDIA 2010.** Definición Sentina. [En línea] <http://wapedia.mobi/es/Special:Search?search=SENTINA&skl=lr&searchtype=>. [Citado el: 16 de Junio de 2010.]
6. **ALBARRACÍN, Pedro.** Tribología y Lubricación Industrial y Automotriz. Cuarta Edición. Bucaramanga : Litochoa, 2006. Vol. TOMO I.
7. **ALVARES, Alberto; CORTEZ, Elkin y ALVAREZ, Fernando.** Criterio para la selección y aplicación de lubricantes. Medellín : UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 1998.
8. **MONTORIO, Lino.** Contribución al desarrollo y mejora de técnicas para la detección y análisis de partículas metálicas y contaminantes en aceites lubricantes usados. Valencia : Tesis (Doctorado en Ingeniería Química). Universidad Pontificia de Valencia, 2005. págs. 16-20.
9. **SHELL.** Introducción a los lubricantes y a la lubricación. Módulo 1 : Tutor de lubricación Shell.
10. **MARTÍNEZ, Francisco.** LA TRIBOLOGÍA, Ciencia y técnica para el mantenimiento. México : Limusa, S.A., 1997. págs. 101-134.

11. **ENERGÉTICOS ECOLÓGICOS MIGA, S.A DE C.V.** Reingeniería y operación de una planta de tratamiento de aceites usados e hidrocarburos para la formulación de combustible alterno, ubicado en el municipio de los Reyes la Paz, Estado de México. [En línea] <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/mex/estudios/2006/15EM2006I0018.pdf>, Agosto de 2006. [Citado el: 11 de Octubre de 2010.]
12. **ALVARADO, Luis.** Aplicación de la espectroscopía infrarroja en el estudio de los aceites lubricantes. Bucaramanga : Tesis (Pregrado en Química).Facultad de Ciencias. Departamento de Química. Universidad Industrial de Santander, 1989.
13. **COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, et al.** Manual Técnico para el Manejo de Aceites Lubricantes Usados. Bogota D.C : Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006.
14. **NUÑEZ, María Eugenia.** Aceite usado generado por motores en la Ciudad de Cali. Alternativas de uso. Junio de 2001, págs. 4-11.
15. **REYES, Gloria A.** Aplicación del proceso PROP modificado para la recuperación de aceites lubricantes. Bucaramanga : Trabajo de Grado (Química). Facultad de ciencias. Departamento de Química. Universidad Industrial de Santander, 1987. págs. 1-25.
16. **MARTÍNEZ, J.** Guía para la gestión integral de residuos peligrosos. [En línea] http://www.basel.int/centers/proj_activ/stp_projects/08-03.pdf, Uruguay, 2005. [Citado el: 04 de Octubre de 2010.] Editorial Red de Centros.
17. **SCOREL DE AZEVEDO, Pedro U.** Revisión y análisis de las experiencias de Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador y México respecto a los cinco elementos claves para el manejo ambiental de lubricantes usados. [En línea] <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsare/e/lubricantes-vfinal.pdf>, São Paulo, Brasil. [Citado el: 10 de Noviembre de 2010.]
18. **BASEL CONVENTION.** Technical Guidelines on Used Oil Re-Refining of Other Re-Uses of Previously Used Oil. 2002. ISSN: 1020-8364.
19. **FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN.** Plan técnico para el manejo ambientalmente correcto de residuos aceitosos. En:_____. Factibilidad del manejo ambientalmente correcto de los residuos aceitosos en Guayaquil. Guayaquil - Ecuador : Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2006, Cáp: 6.

20. **MONTES C, Margarita.** TRATAMIENTO DE RESIDUOS: Re-refinado de Aceites Usados. Vigo-España : Tesis (Especialista en Química Industrial). Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial. Universidad de Vigo., 2003.
21. **COLOMBIA.MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA Y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO-ENERGÉTICA.** Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión. Bogotá D.V : s.n., 2001.
22. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 95-05 (2005).** Standard Test Method for Water in Petroleum Products and Bituminous Materials by Distillation. 2001 : ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
23. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 445-10 (2010).** Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). 2010 : ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
24. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 2270-2010.** Standard Practice for Calculating Viscosity Index From Kinematic Viscosity at 40 and 100°C. 2010 : ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
25. **Join API/ASTM Committee on Static Petroleum Measurement, Physical Properties Working Group, American Society for Testing and Materials, American Petroleum Institute.** Petroleum Measurement Tables. s.l. : American Society for Testing and Materials, USA, 1980.
26. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 92-05 (2005).** Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. 2005 : ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
27. **EXXON COMPANY.** Tables of useful information. USA : Exxon Company, 1988. pág. 61.
28. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 240-09 (2009).** Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. 2009 : ATMS Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
29. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 2896-07 (2007).** Standard Test Method for Base Number of Petroleum Products by Potentiometric Perchloric Acid Titration. s.l. : ASTM Standards.
30. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 6595 (2005).** Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used

Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry. 2005 : ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.

31. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 4294 (2010)**. Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry. 2010 : ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.

32. **AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION Y WATER POLLUTIONS CONTROL FEDERATION**. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Broadway, New York : Andrew D. Eaton; et al, 2005.

33. **CARVAJAL PRADA, Jose Javier y DELGADO MEJIA, Jose Luis**. Problemática ambiental de los aceites lubricantes usados en Colombia y análisis de las alternativas para su disposición. Bucaramanga : Tesis (Especialista en Ingeniería Ambiental). Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander, 2006.

34. **PÉREZ, Ovidio y VILLEGAS, Alfredo**. El calor de combustión y el ahorro de energía. [En línea] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia20/HTML/articulo06.htm>. [Citado el: 1 de Dic de 2010.]

35. **ENCICLOPEDIA WIKIPEDIA 2010**. FUEL-OIL. [En línea] <http://es.wikipedia.org/wiki/Fueloil>. [Citado el: 05 de 12 de 2010.]

36. **INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION 8217**. Petroleum products - Fuels (Class F). Specifications of marine fuels. 2005 : ISO copyright office, Switzerland.

37. **MARFISI Shirley y SALAGER Jean Luis**. DESHIDRATACIÓN DE CRUDO. Principios y Tecnología. [En línea] http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S853PP_Deshidratacion.pdf. [Citado el: 4 de Abril de 2011.]

38. **COLOMBIA. DEPARTAMENTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE - DAMA-**. Manual de Normas y Procedimientos para la Gestión de Aceites Usados. Bogotá D.C. : Fondo de Aceites Usados, Agosto de 2003.

ANEXOS

ANEXO A. SISTEMA INTEGRAL DE GESTIÓN PARA LOS ACEITES USADOS

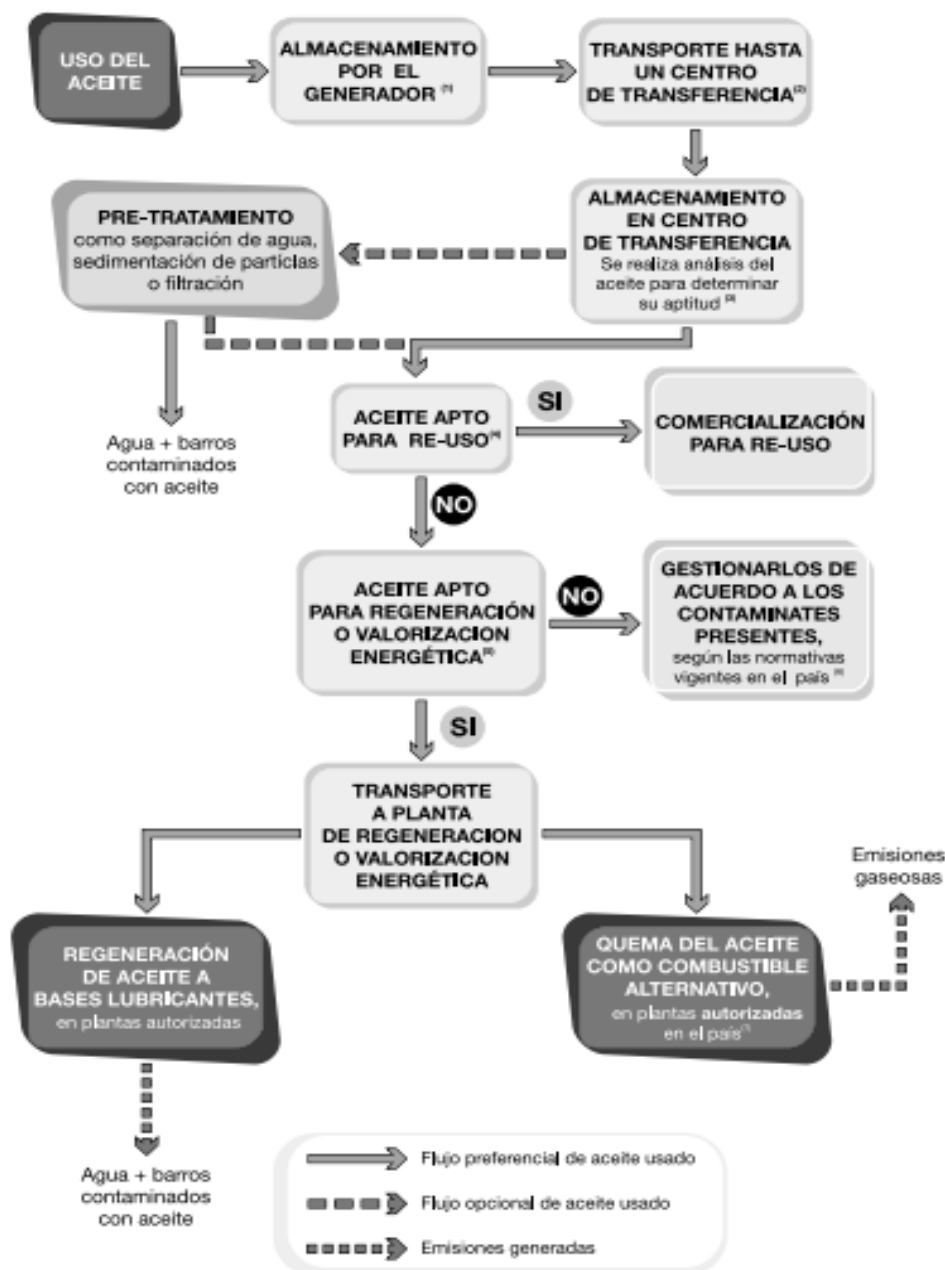


FIGURA A1 Esquema de un Sistema Integral de Gestión para los Aceites Usados

Fuente: MARTÍNEZ, J. Guía para la gestión integral de residuos peligrosos. [En línea]. Editorial Red de Centros. Tomo II, Uruguay 2005. Pág.36 [consultado 4 de Octubre de 2010]. Disponible en <http://www.basel.int/centers/proj_activ/stp_projects/08-03.pdf>

ESQUEMA DE RECOLECCIÓN PROPUESTO POR EL FAU

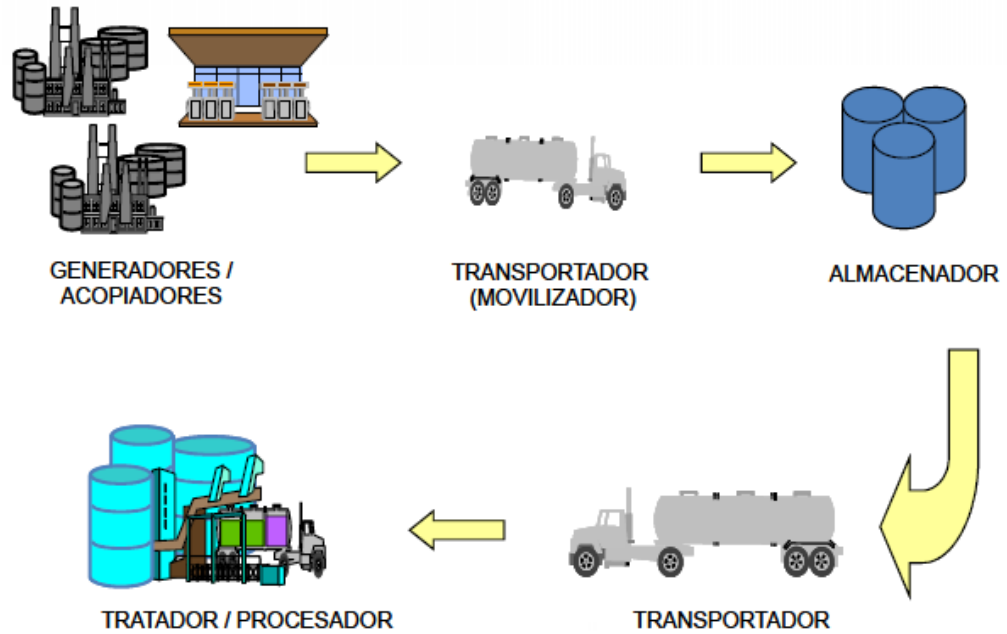


FIGURA A2: Esquema de recolección propuesto por el FAU

Fuente: FONDO ACEITES USADOS (FAU), ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO. Foro Internacional: Supervisión y Fiscalización Ambiental en el Sector Hidrocarburos. [En línea] <http://www.osinerg.gob.pe/newweb/pages/GFH/ForoUMAL/tema10.pdf>, Julio de 2008. [Citado el: 19 de Octubre de 2010.]

ANEXO B. MARCO NORMATIVO PARA EL APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN DEL ACEITE USADO. NORMATIVIDAD COLOMBIANA

Tabla B. 1 Normatividad para el aprovechamiento y disposición del aceite usado

NORMA	ENTIDAD	DISPOSICIÓN
Decreto Ley 2811 de 1974	Congreso de la República.	Por medio del cual se expide el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables al Medio Ambiente.
Ley 9 de 1979	Congreso de la República.	Por medio de la cual se dictan medidas Sanitarias (Protección del Medio Ambiente, Emisiones Atmosféricas, Tratamiento de Residuos)
Ley 99 de 1993	Congreso de la República.	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental – SINA- y se dictan otras disposiciones.
Ley 253 de 1996	Congreso de la República.	Por medio de la cual se aprueba en Colombia el Convenio de Basilea y se considera el principio del manejo ambiental Nacional de los desechos peligrosos dentro de los cuales se incluyen los Aceites Usados.
Ley 430 de 1998	Congreso de la República.	Por medio de la cual se dictan las normas prohibitivas en materia ambiental referente a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones (responsabilidad por el manejo integral de los residuos: proceso de producción, gestión y manejo de los mismos).
Decreto 1594 de 1984	Ministerio de Salud.	Sobre los usos del agua y residuos líquidos (vertimientos de residuos líquidos a un cuerpo de agua o a una red de alcantarillado)
Decreto 283 de 1990	Ministerio de Minas y Energías.	Por el cual se reglamenta el almacenamiento, manejo, transporte, distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo y el transporte por carro tanques de petróleo crudo.
Decreto 1609 de 2002	Ministerio de Transporte	Por medio del cual se reglamenta el manejo y transporte automotor de mercancías peligrosas por carretera.

Resolución 898 de 1995	Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial.	Por la cual se regulan los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y calderas de uso comercial e industrial.
Resolución 1446 de 2005	Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial.	Por la cual se establecen los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho o usados y las condiciones técnicas para realizar la misma.
Decreto 1220 de 2005	Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial.	Por la cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales (la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, aprovechamiento, recuperación y/o disposición final de residuos o desechos peligrosos, requiere de licencia ambiental).
Decreto 4741 de 2005	Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial.	Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.
Resolución 1188 de 2003	Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente.	Por la cual se adopta el manual de normas y Procedimientos para la gestión de Aceites Usados.
Resolución 318 de 2000	Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente.	Por la cual se establecen las condiciones técnicas para el manejo, almacenamiento, transporte, utilización y disposición de aceites usados.
Decreto 3930 de 2010	Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial.	El presente decreto establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.
Fuente: El Autor		

ANEXO C. PROPIEDADES DE CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE SENTINA

1. PROPIEDADES DEL ACEITE

Tabla C. 1 Caracterización de aceites usados: Propiedades y Normas

PROPIEDAD	NORMA
Viscosidad a 40 y 100°C	ASTM D-45
Índice de Viscosidad	ASTM D-2270
Gravedad Específica	-----
°API	-----
Punto de Inflamación	ASTM D-92
Calor de Combustión	ASTM D-240
TBN	ASTM D-2896
Metales de Desgaste ¹³	ASTM D-6595
Contenido de Azufre	ASTM D-4294
Fuente: El autor	

- La viscosidad: es probablemente la propiedad física más importante de un aceite lubricante de petróleo. Se define como la resistencia interna a fluir que presentan las moléculas de un líquido cuando pasan unas al lado de otras, en su movimiento, a una temperatura determinada; así, cuanto más espeso sea el aceite, mayor es su resistencia a fluir y por lo tanto mayor es su viscosidad.
- El Índice de Viscosidad (I.V.): se define como la mayor o menor estabilidad de la viscosidad de un aceite lubricante con los cambios de temperatura. Entre mayor sea el I.V., más estable es el aceite (mas bajo es el efecto de la temperatura sobre su viscosidad).
- La Gravedad Específica: se define como la relación entre el peso de un volumen dado de un aceite y el peso de un volumen idéntico de agua, a una temperatura específica. En los aceites derivados del petróleo siempre es menor de 1. El valor de la gravedad específica no es un parámetro fundamental para definir si un aceite usado puede o no continuar en servicio,

¹³ METALES DE DESGASTE: Cobre, Hierro, Plomo, Silicio, Cromo, Aluminio, Estaño, Níquel y Vanadio.

porque un aumento en este valor puede indicar oxidación o contaminación con partículas solidas.

- °API: de sus siglas en inglés American Petroleum Institute, es una medida de densidad que describe cuán pesado o liviano es el petróleo (o sus derivados) comparándolo con el agua. Si los grados API son mayores a 10, es más liviano que el agua, y por lo tanto flotaría en ésta.
- Punto de Inflamación: es la temperatura mínima a la cual los gases formados se inflaman por un instante al aproximarles una chispa o llama.
- Calor de Combustión o Poder Calorífico: El poder calorífico es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de combustión.
- Numero Básico Total TBN: Es la alcalinidad del aceite y especifica la cantidad en miligramos de un ácido que es necesario añadirle a cada gramo de aceite para que neutralice las sustancias básicas que posee.
- Metales de desgaste: Hace referencia a los metales como: cobre, hierro, plomo, silicio, cromo, aluminio, estaño, níquel y vanadio que se encuentran en los aceites lubricantes usados. El origen de estos metales es principalmente el desgaste de la maquinaria en la cual fueron empleados los aceites y el contacto de éstos con combustibles.

2. PROPIEDADES DEL AGUA

Tabla C. 2 Caracterización de aguas de sentina: Propiedades y Métodos.

PARÁMETRO	MÉTODO
Demanda Química de Oxígeno	Titrimétrico / SM- 5220 C Flujo Cerrado
Demanda Biológica de Oxígeno	Respirómetro / SM 5210 D
Sólidos Suspendidos Totales	Gravimétrico / SM 2540 D
Grasas y Aceites	Extracción Líquido/Líquido Gravimétrico SM 5520 B
Cromo Total	Absorción Atómica/SM 3111 D
Azufre	Turbidimétrico / SM 4500-SO ₄ ⁻² E Conversión Estequiométrica
Níquel	Absorción Atómica / SS 3111 B
Cadmio	Absorción Atómica / SS 3111 B
Fuente: El Autor	

- *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*: es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO₂/l).
- *Demanda Biológica de Oxígeno*: La demanda biológica de oxígeno (DBO), es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Se utiliza para medir el grado de contaminación, normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO₅), y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO₂/l).
- *Sólidos Suspendidos Totales*: Los sólidos totales (ST) son la suma de todos los sólidos disueltos y suspendidos en el agua. Cuando el agua se analiza para los ST se seca la muestra y el residuo se pesa después.
- *Grasas y aceites*: Se refiere al contenido de grasas y aceites que se encuentran dentro de una muestra líquida.
- *Contenido de Cromo, Níquel, Azufre y Cadmio*: Se refiere al contenido de estas sustancias dentro de una muestra líquida y constituyen sustancias de contaminación.

ANEXO D. SEGURIDAD Y MANEJO DE RESIDUOS DURANTE EL DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Teniendo en cuenta la alta toxicidad de los aceites usados como tal, durante el contacto y el manejo de los residuos de sentina, en cada una de las etapas del desarrollo experimental (Figura No. 2, del presente trabajo), se hizo indispensable el uso de equipos de protección personal:

- Bata de laboratorio,
- Guantes de nitrilo,
- Lentes de seguridad y
- Respirador de media cara.

Así mismo, con el fin de llevar a cabo un proyecto ambientalmente seguro, se realizó un adecuado manejo de residuos durante el desarrollo de todas las etapas:

- En bolsas rotuladas “residuos sólidos impregnados con aceite usado”, se depositaron los residuos resultantes tales como papeles toallas, guantes usados, papel periódico impregnado de aceite y otros materiales.
- En recipientes rotulados “Residuos de aceite usado y disolvente”, se almacenaban todos los residuos de aceites usados y el disolvente utilizado durante el lavado de los materiales empleados, evitando así depositar este tipo de residuo tóxico y altamente contaminante directamente al alcantarillado.

Estos residuos quedaron a disposición de las empresas prestadoras del servicio de recolección.

ANEXO E. ETAPA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

PROCEDIMIENTO DE DESCARGA DE SENTINAS

Para la realización de la descarga de sentina, de manera general, se realizan los siguientes pasos:

- Adaptación del bongo por parte de la empresa que brinda el servicio de recepción de descarga de sentinas a la embarcación que realizará la descarga.
- Conexión de las mangueras a las válvulas de las embarcaciones que permiten la descarga de las sentinas y al tanque del bongo que recibirá el total de la descarga.
- Revisión de las conexiones realizadas con el fin de evitar algún derrame por la presión de la descarga.
- Apertura de las válvulas de descarga de las embarcaciones-recepción de los residuos en el bongo.

Con el fin de evaluar si existen mucha diferencia en cuanto a las propiedades físicas y químicas de los aceites de sentina provenientes de diferentes barcos, se tomaron muestras de 6 barcos diferentes, así mismo, y teniendo en cuenta que la descarga dura en promedio entre 5 y 12 horas, las muestras se toman en tres puntos diferentes de la descarga (inicio, mitad y final), buscando garantizar una mejor caracterización, principalmente en cuanto al contenido de agua, el cual puede variar significativamente entre cada punto, pues tanto el agua libre como la que se encuentra formando emulsiones pueden ocupar un lugar diferente dentro de las sentinas y en su descarga; dando un total de 18 muestras recolectadas. Las muestras fueron colectadas en recipientes plásticos con capacidad de 25 litros. Una vez recogidas, se identificó cada recipiente mediante números (desde el 1 al 6) cada uno de los cuales identifica el barco del cual procede la muestra, seguido de las letras A, B y C, que indican el punto de muestreo, siendo A el inicio, B la mitad y C el final de la descarga.

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS COLECTADAS

Tabla E. 1 Información de las muestras recolectadas

No Muestra	DATOS DE RECOLECCIÓN				DATOS DE LA EMBARCACIÓN				
	Fecha	Can. de Descarga (m ³)	Duración (h)	Can. Muestra Tomada (m ³)	Nombre	Año de Const.	Combustible Empleado	Aceite Lubricante Empleado	Tipo
1	30-03-10	34	6	3*25 L c/u	MASSDAM	1994	HFO IF 380	Mobilgard 570	Crucero
2	31-03-10	38	12	3*25 L c/u	CAP PALLISTER	2007	FO y MFO	Energol OE-HT30 Energol IC-HFX 304 Energol CLO 50M	De carga
3	02-04-10	30	7	3*25 L c/u	CAP PRESTON	2007	IFO 380	Energol OE- HT 30	De carga
4	03-04-10	43	4	3*25 L c/u	OCEAN DREAM	1981	HFO 380	Shell Melina 30	Crucero
5	03-04-10	36	3	3*25 L c/u	ISLAND PRINCESS	2003	HFO 380	Energol OE-HT 30	Crucero
6	24-04-10	56	4	3*25 L c/u	ANTONIA SHCULTE	2005	HFO 380	Mobil Jet Oil II	De carga

Fuente: El autor

Tabla E. 2 Propiedades de los Aceites

PROPIEDAD	TIPO DE ACEITE					
	MOBILGARD 570 ^I	ENERGOL OE-HT 30 ^{II}	ENERGOL IC-HFX 340 ^{III}	ENERGOL CLO 50 M ^{IV}	SHELL MELINA 30 ^V	MOVIL JET OIL II ^{VI}
Densidad a 15°C kg/l	0,937	0,910	0,910	0,940	0,897	1,0035
Punto de Inflamación °C	256	230	>200	197	227	270
Viscosidad Cinemática cSt a 40°C	222	105	139	225	104	27,6
cSt a 100°C	20	11,5	14,3	19,5	11,8	5,1
Punto de Fluidez °C	-9	-12	-12	-9	-18	-59
TBN	70	5	30	5	8	4
Cenizas, %Peso	-	0,8	3,6	10	1	1
Fuente: El autor						

^I EXXON MOBIL. Marine Lubricants [En línea] http://xom.ee/files/197_glxxenmrnemobilgard_570.pdf. [Citado el: 5 Abril de 2010.]

^{II} PETRO-CANADÁ. TechData, [En línea] <http://lubricants.petro-canada.ca/resource/download.aspx?type=TechData&iproduct=1047&language=en>. [Citado el: 1 Abril de 2010.]

^{III} PETRO-CANADÁ. TechData, [En línea] <http://lubricants.petro-canada.ca/resource/download.aspx?type=TechData&iproduct=1044&language=en>. [Citado el: 1 Abril de 2010.]

^{IV} PETRO-CANADÁ. TechData, [En línea] <http://lubricants.petro-canada.ca/resource/download.aspx?type=TechData&iproduct=1039&language=en>. [Citado el: 1 Abril de 2010.]

^V Shell Melina Oil [En línea] http://www.static.shell.com/static/phl/downloads/shell_for_businesses/power/melina_oil_30_40.pdf[Citado el: 5 Abril de 2010.]

^{VI} EXXON MOBIL. Mobil Jet Oil II. [En línea] http://www.ingdatri.com.ar/descargar_archivo_lubricante.php?fileID=214 [Citado el: 26 Abril de 2010.]

ANEXO F. CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES DE SENTINA

1. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA

La determinación de la viscosidad cinemática se llevo a cabo en los Laboratorios Certificados de la empresa C.I PROQUIMSA LTDA., para esto, 100 ml de cada una de las seis muestras fueron llevadas a Barrancabermeja en envases plásticos con doble tapa y rotulados “Aceite Lubricante Usado” junto con una numeración que permitió su identificación.

La viscosidad cinemática a 40° y 100° C se halló aplicando la norma ASTM D445. Este método se basa en la medición del tiempo que toma un volumen de líquido para fluir con la gravedad a través de un viscosímetro capilar de vidrio calibrado.

Los viscosímetros a utilizar se seleccionaron teniendo en cuenta la viscosidad estimada; según lo anterior, un capilar ancho para un líquido muy viscoso y un capilar más estrecho para un líquido más fluido. Por tratarse de aceites residuales y productos cerosos, los viscosímetros empleados son Cannon-Fenske (de flujo invertido).

Procedimiento:

1. Se ajustan los baños de aceites en las temperaturas de prueba.
2. Se limpian los viscosímetros utilizando solventes y se secan haciendo pasar aire impío y seco.
3. Para cargar la muestra en el viscosímetro, se invierte el instrumento y se aplica vacío en el tubo L, el tubo N se sumerge en la muestra y el líquido se succiona hasta llegar al menisco G, se limpia el brazo N y se gira el instrumento a su posición vertical normal.

4. Se coloca el viscosímetro en el soporte y se introduce en el baño a temperatura constante.
5. Se deja que la muestra fluya a través del tubo R hasta aproximadamente la mitad de llenado del bulbo A (se puede detener el movimiento de la muestra dentro del capilar mediante la colocación de un tapón de goma alguno de los tubos N o L)
6. Se espera de 10 a 15 minutos para asegurarse de que la muestra llegue a la temperatura del baño.
7. Se retira el tapón de goma y se permite que la muestra fluya por el bulbo C tomando el tiempo que tarda la muestra al pasar desde la marca E hasta la marca F.
8. Se calcula la viscosidad cinemática de la muestra multiplicando el tiempo de flujo en segundos por la constante del viscosímetro (para el bulbo c)
9. El mismo procedimiento puede realizarse permitiendo que la muestra fluya por el bulbo J y tomando el tiempo que tarda la muestra en pasar de la marca F a la marca I.



Las viscosidades se calcularon de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$V_{cinemática} = Ct$$

Donde:

$$V_{cinemática} = \text{Viscosidad Cinemática, } \frac{mm^2}{s} \text{ o } Cst$$

$$C = \text{Constante de calibración del viscosímetro, } mm^2/s^2$$

$$t = \text{tiempo de flujo medido, } s$$

2. DETERMINACIÓN DEL INDICE DE VISCOSIDAD.

El índice de viscosidad de los aceites fue calculado con las tablas incluidas en el método ASTM D 2270 y a partir de las viscosidades cinemáticas medidas a 40 y 100 ° C mediante la siguiente fórmula:

$$I.V = [(L - V)/(L - H)] * 100$$

Donde:

V = Viscosidad cinemática a 40°C del aceite al cual se le va a calcular el IV, mm²/s²

L y H = Valores tomados de tablas de acuerdo a los valores de viscosidades a 40 y 100 °C

3. DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA

Materiales:

- Picnómetro con termómetro
- Balanza Adventurer Analítica
- Disolvente
- 100 ml de muestra

Procedimiento:

La determinación de la gravedad específica se realizó con base en la medición de la densidad por medio de un picnómetro.

Para la determinación de la densidad de cada muestra se realiza el siguiente procedimiento:

1. Se pesa el picnómetro vacío y se registra la medición.
2. Se llena el picnómetro con la muestra y se pesa registrando la medición y la temperatura a la cual se encuentra la muestra en ese momento.
3. La diferencia de pesos determina el peso de la muestra, *m*.
4. Teniendo el peso de la muestra (*m*) y el volumen calibrado del picnómetro (*v*), se calcula la densidad (*ρ*) así:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Con la densidad y la temperatura a la cual ésta fue determinada, por medio de tablas encontradas en el libro “Petroleum Measurement tables”, se determina la gravedad específica de cada una de las muestras.

4. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE INFLAMACIÓN

La determinación del punto de inflamación se llevo a cabo en los Laboratorios Certificados de la empresa C.I PROQUIMSA LTDA., para esto, 100 ml de cada una de las seis muestras fueron llevadas a Barrancabermeja en envases plásticos con doble tapa y rotulados “Aceite Lubricante Usado” junto con una numeración que permitió su identificación.

Materiales:

Para esta prueba basada en la norma ASTM D 92, se utilizó un aparato Cleveland de Copa Abierta manual que consiste de una copa de prueba (cápsula de bronce sostenida por un anillo metálico), un termómetro, una placa de calentamiento y un aplicador de llama de prueba.

Procedimiento:

Se llena la copa de prueba con aproximadamente 70 ml de espécimen de prueba, la temperatura de la muestra se aumenta rápidamente al principio y luego a una rata constante más lenta mientras que se acerca al punto de inflamación. Durante intervalos especificados una llama de prueba se pasa a través de la copa. El punto de inflamación es la menor temperatura del líquido a la que el uso de la llama de prueba hace que los vapores de la muestra se enciendan.

5. DETERMINACIÓN DEL CALOR DE COMBUSTIÓN

Método Gráfico

Teniendo las mediciones de la gravedad específica o el ° API, con la grafica “Calor de combustión en combustibles” Figura F.1 puede determinarse el calor de combustión.

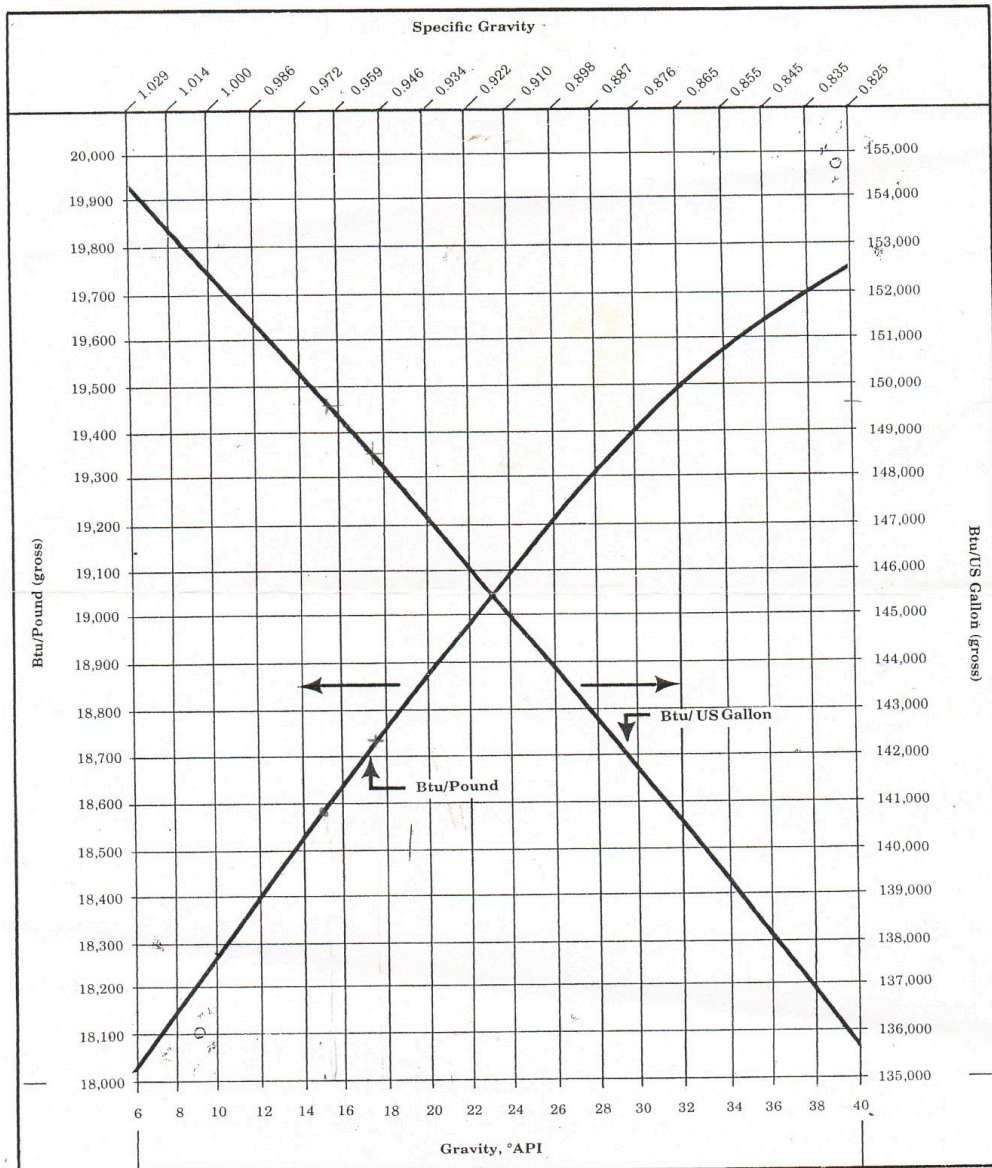


Figura F.1 Calor de Combustión en combustibles.

Fuente: EXXON COMPANY. *Tables of useful information*. USA : Exxon Company, 1988. pág. 61.

Por norma ASTM D 240

El calor de combustión fue determinado por la Universidad Nacional de Colombia, empleando el método de prueba ASTM D 240 a tres muestras de aceite. Para esto, 100 ml de cada una de las tres muestras fueron enviadas a Bogotá en envases plásticos con doble tapa y rotulados “Aceite Lubricante Usado” junto con una numeración que permitió su identificación.

Básicamente el método determina el calor de combustión quemando una muestra del aceite previamente pesada, en atmósfera de oxígeno en una bomba calorimétrica bajo condiciones controladas. El calor de combustión se calcula a partir de las observaciones de la temperatura, antes, durante y después de la combustión, con la aplicación de las correcciones termoquímicas y de transferencia de calor necesarias.

6. DETERMINACIÓN DEL INDICE DE BASICIDAD Y DEL CONTENIDO DE METALES DE DESGASTE

El índice de basicidad y el contenido de metales de desgaste fueron calculados por CYAT, Consultoría y análisis técnicos (Bogotá) a tres muestras de aceite. Para esto, 100 ml de cada una de las tres muestras fueron enviadas a Bogotá en envases plásticos con doble tapa y rotulados “Aceite Lubricante Usado” junto con una numeración que permitió su identificación.

El TBN analizado bajo el método de prueba ASTM D 2896, indica la cantidad de miligramos de hidróxido de potasio que es necesario añadirle a un grado de la muestra de aceite para neutralizar todos sus componentes básicos.

Los metales de desgaste determinados por el método ASTM D 6595 son: el cobre, el hierro, el plomo, el silicio, el cromo, el aluminio, el estaño, el níquel y el vanadio.

El método ASTM D 6595, trabaja en la base de que los átomos de elementos metálicos y otros elementos particulares emiten luz a longitudes de onda características, cuando son excitados en una flama, chispa o arco. La luz excitada es directamente conducida a través de una rendija de entrada al espectrómetro. Esta luz penetra por la ranura a un difusor y es dispersada y reflejada. Determina de forma rápida las concentraciones de metales en partes por millón (ppm) contenidos en los lubricantes, ya sea formando parte de los aditivos o como partículas contaminantes.

7. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AZUFRE

El contenido de azufre fue determinado por el Laboratorio de Caracterización y evaluación de Crudos del Instituto Colombiano de Petróleo bajo el método de prueba ASTM D 4294 a tres muestras de aceite. Para esto, 100 ml de cada una de las tres muestras fueron enviadas al ICP en Piedecuesta, en envases plásticos con doble tapa y rotulados “Aceite Lubricante Usado” junto con una numeración que permitió su identificación.

La muestra se coloca en el haz emitido por un tubo de rayos X. La radiación de excitación característica resultante X es medida y la cantidad es acumulada y comparada con cantidades de muestras de calibración preparadas previamente para obtener la concentración de azufre en % en masa y/o mg/Kg.

ANEXO G. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE SENTINA

1. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Mediante un proceso de decantación durante 72 horas, en columnas de cromatografía en vidrio PYREX de 35 mm de diámetro y 74 cm de altura, acondicionadas con una llave de teflón, se realizó la separación de fases agua-aceite.

Se tomó litro y medio de agua de cada una de las tres muestras; un litro se envaso en un recipiente plástico y el medio litro restante en un recipiente de vidrio de boca ancha para la determinación de las grasas y los aceites, ambos recipientes se rotularon como “Agua Residual Industrial” junto con un número que permitiera su identificación y fueron previamente refrigerados antes de ser enviados al Laboratorio de Consultas Industriales –UIS–.

2. DETERMINACION DE PARÁMETROS

2.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

La determinación de la demanda química de oxígeno se realizó por el método SM-5220 C (titrimétrico por flujo cerrado). Para esto se utilizan tubos de ensayo con tapa rosca donde se adiciona la muestra con la solución digestora, se agrega ácido sulfúrico y se mezcla completamente. Se lleva el tubo a una temperatura de 150°C por dos horas, se dejan enfriar a temperatura ambiente y se titula con el Sulfato Amónico ferroso (FAS) utilizando como indicador el Ferroín, para obtener un viraje de color de azul verdoso a café rojizo. Una vez obtenidos los ml de FAS consumidos en la titulación se calcula la demanda química de oxígeno así:

$$DQO \left[mg \frac{O_2}{L} \right] = \frac{(A - B) * M * 8000}{ml \text{ de muestra}}$$

Donde: A= ml de FAS usados para el blanco

B= ml de FAS usados para la muestra

M= molaridad de FAS

2.2 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

La demanda bioquímica de oxígeno se determinó mediante el método SM-5210 D (respirómetro). Este método proporciona una medida directa del oxígeno consumido por los microorganismos en un ambiente enriquecido con oxígeno, en un recipiente cerrado en condiciones de temperatura y agitación constante. El procedimiento realizado es el determinado por el método citado (32)

2.3 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

El contenido de sólidos suspendidos fue determinado bajo el método SM-2540 D (Gravimétrico). Una muestra bien mezclada es filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio previamente pesado, el residuo obtenido en el filtro es secado a una temperatura de 103 a 105°C y el aumento del peso del filtro representa los sólidos suspendidos totales (información adicional sobre el procedimiento puede ser estudiado revisando el método citado).

2.4 CROMO, NIQUEL Y CADMIO.

La determinación del contenido de cromo, níquel y cadmio se realizó bajo el método SM-3111 (determinación de metales por espectrometría de absorción atómica de llama). En la espectrometría de absorción atómica de llama, una muestra es trasladada a una llama y atomizada. Un haz de luz es dirigido a través de la llama, en un monocromador y un detector mide la cantidad de luz absorbida por el elemento atomizado. Cada metal tiene su propia longitud de onda de absorción característica. La cantidad de energía absorbida en la longitud de onda característica es proporcional a la concentración del elemento dentro de la muestra (información adicional sobre el procedimiento puede ser estudiado revisando el método citado).

2.5 CONTENIDO DE AZUFRE

El contenido de azufre se determinó bajo el método SM- 4500-SO₄⁻² E (método turbidimétrico). El ión sulfato (SO₄⁻²) se precipita en un medio de ácido acético con cloruro de bario (BaCl₂) para formar cristales de sulfato de bario (BaSO₄) de tamaño uniforme. La absorbancia luminosa de la suspensión de BaSO₄ se mide con un fotómetro y la concentración de SO₄⁻² es determinada por la comparación de la lectura con una curva estándar.

ANEXO H. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS

Tabla H. 1 Resultados de las pruebas de determinación del contenido de agua por destilación atmosférica y secado en horno.

BARCO	MUES.	MUESTRA INICIAL (ml)	AGUA (ml)	COMB (ml)	ACEITE (ml)	Ti (°C)	Tf (°C)	Tiempo (h)	AGUA HORNO (ml)	AGUA TOTAL (ml)	Agua por Barco	% de Agua por barco
1	1A	300	196	8	25	102	132	6	-	196	948,2	55,35
		300	200	7	20	105	140	6	-	200		
	1B	300	147	11	125	105	145	7.3	13,8	160,8		
		300	130	10	140	102	137	7	15,7	145,7		
	1C	300	136	6	140	108	140	7	12,7	148,7		
		300	132	7	140	105	135	6	13,2	145,2		
2	2A	300	231	6	30	102	128	7	-	231	547,2	60,8
		300	235	6	25	102	133	7	-	235		
	2B	300	180	9	100	105	130	5.5	9,5	189,5		
		300	187	8	90	102	140	6	6,3	193,3		
	2C	300	107	9	170	103	160	7.5	12	119		
		200	115	9	165	105	145	7	11,6	126,6		
3	3A	300	153	6	135	104	135	7	5	158	249,8	27,8
		300	162	4	125	102	140	7	6,8	168,8		
	3B	300	48	4	210	103	132	6.5	8,5	56,5		
		300	40	4	220	102	140	6	7,2	47,2		
	3C	300	31	5	235	108	145	4.5	3,7	34,7		
		300	29	4	235	105	139	5	5,3	34,3		
4	4A	300	199	11	80	108	140	7.2	5,4	204,4	537	59,67
		300	185	10	85	105	145	7	5	190		
	4B	300	145	5	115	108	125	8.4	8,4	153,4		
		300	154	6	110	107	130	8	8	162		
	4C	300	178	10	100	108	140	7	7,2	185,2		
		300	174	8	100	107	160	6	5	179		
5	5A	300	184	9	90	104	140	7.5	7,5	191,5	555,5	61,72
		300	196	7	80	107	160	6	5	201		
	5B	300	281	4	-	105	143	8	-	281		
		300	275	4	-	102	145	8	-	275		
	5C	300	76	5	210	108	140	4.5	4,5	80,5		
		300	78	6	210	105	145	3	3,9	81,9		
6	6A	300	40	10	230	103	140	7.5	6,7	46,7	101,5	11,28
		300	48	10	225	102	135	7	3,5	51,5		
	6B	300	30	3	250	107	148	6	6,5	36,5		
		300	33	3	250	110	145	6.5	4,9	37,9		
	6C	300	10	4	280	112	165	8	3,9	13,9		
		300	14	3	270	112	170	8	2,6	16,6		

Fuente: El Autor

Tabla H. 2 Propiedades de los aceites secos.

PROPIEDAD	NORMA ASTM	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Viscosidad a 40°C (cSt)	D 445	2.421,19	2.071,45	1.900,30	714,48	597,22	265,55
Viscosidad a 100 °C (cSt)	D 445	59,87	60,35	50,50	33,40	38,65	20,47
Índice de Viscosidad	D 2270	50,7	66,2	44,2	70,8	103,1	89,9
Gravedad Específica		0,998	0,979	0,955	0,963	0,948	0,924
°API		10,27	13,11	16,73	15,51	17,81	21,70
Calor de Combustión* (Btu/Pound (gross))		18.280	18.490	18.710	18.580	18.740	18.960
Calor de Combustión* (MJ/kg)		43,060	43,554	44,072	43,766	44,143	44,661
Calor de Combustión** (MJ/kg)	D 240	-	44,350	44,855	-	45,700	-
Punto de Inflamación (°C)	D 92	224	222	226	232	234	248
TBN (mg de KOH/g)	D2896	-	4,21	4,81	-	5,36	-
Contenido de Azufre (% Peso)	D-4294	2,26	-	1,66	-	-	1,70
Fuente: El autor	Calor de Combustión** suministrado por la Universidad Nacional de Colombia. TBN suministrado por CYAT Consultoría y Análisis Técnicos. Contenido de Azufre suministrado por ECOPETROL (Laboratorio de caracterización y evaluación de crudos)						

* Calor de combustión calculado por el método grafico

** Calor de combustión calculado siguiendo la norma ASTM D 240

Tabla H. 3 Contenido de metales en los aceites secos.

ANALISIS	NORMA	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 5
Cobre (ppm)	ASTM D-6595	7	3	14
Hierro (ppm)	ASTM D-6595	83	118	76
Plomo (ppm)	ASTM D-6595	1	2	3
Silicio (ppm)	ASTM D-6595	60	84	12
Cromo (ppm)	ASTM D-6595	1	1	3
Aluminio (ppm)	ASTM D-6595	33	62	36
Estaño (ppm)	ASTM D-6595	0	0	0
Vanadio (ppm)	ASTM D-6595	93	95	90
Cadmio (ppm)	ASTM D-6595	0	1	0

Fuente: El autor (Resultados suministrados por CYAT, Consultoría y Análisis Técnicos)

ANEXO I. RESULTADOS PRUEBAS DE AGUA

Tres muestras de agua provenientes de barcos diferentes fueron separadas del aceite por medio de procesos de decantación y enviadas al Laboratorio de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander, quienes reportaron los siguientes resultados (Tabla I.1)

Tabla I. 1 Resultados caracterización del agua.

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO	MUESTRA 1	MUESTR A 2	MUESTR A 5
Demanda Química de Oxígeno	mgO ₂ /L	SM 5220 C	5.200	12.000	480
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mgO ₂ /L	SM 5210 D	1.050	1.000	50
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SM 2540 D	106	22	100
Grasas Totales	mg/L	SM 5520 B	23,4	4	12
Cromo Total	mg Cr/L	SM 3111 D	*<0,076	*<0,076	*0,076
Azufre	mg S/L	SM 4500-SO ₄ D	89,1	191	696,8
Níquel	mg Ni/L	SM 3111 B	*<0,123	*<0,123	0,30
Cadmio	mg Cd/L	SM 3111 B	*<0,014	*<0,014	*0,014

Fuente: el autor (Resultados suministrados por el Laboratorio de Consultas Industriales -UIS-).

Como puede observarse, no existe ninguna relación entre los resultados; dado que cada muestra proviene de un barco diferente y aspectos como el tiempo de almacenamiento del agua, sustancias empleadas en el lavado de máquinas de los barcos, contaminación con agua de mar, tiempo de contacto del agua con los aceites lubricantes, entre otros, hacen que las características varíen de un barco a otro.

Dada la amplia variabilidad de los resultados obtenidos de la caracterización de las muestras puntuales de agua, no es posible realizar un estimado de las propiedades generales que tendrían las aguas residuales resultantes de la separación agua-aceite de los residuos de sentina.

Sin embargo, a nivel industrial, residuos de sentinas de diferentes barcos serían mezclados y posteriormente sometidos a procesos de separación agua-aceite, generando un agua residual compuesta, a la cual, la aplicación de pruebas para la medición de diferentes parámetros de interés generaría una visión más aproximada sobre las características de este residuo.

VERTIMIENTOS

Las aguas que resultan de la separación de la fase acuosa de la oleosa son denominadas aguas residuales industriales, no existen parámetros que determinen si el agua se encuentra dentro de rangos aceptables de contaminación, ya que sus características dependen directamente de las actividades en las cuales están involucradas.

El Decreto 3930 del 25 de Octubre de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en el artículo 28 (modificado por el Decreto 4728 de Diciembre de 2010) sobre la fijación de la norma de vertimiento, establece que el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial expedirá las normas de vertimientos puntuales a aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público dentro de los 10 meses contados a partir de la fecha de publicación del decreto y establecerá las normas de vertimientos al suelo y aguas marinas, dentro de los 36 meses contados a partir de la fecha de publicación del decreto.

Hasta la fecha no se han publicado las normas para los vertimientos de aguas residuales industriales, por lo tanto, la norma vigente para la realizar vertimientos está dada por el Decreto 1594 de 1984, el cual en los artículos 72 y 73 establece que todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir por lo menos, con las normas encontradas en la Tabla I.2 y el artículo 74 establece las concentraciones para el control de la carga de sustancias de interés sanitario como arsénico, bario, cadmio, cobre, plomo, cromo, mercurio, níquel, plata, selenio, cianuro, sulfuro de carbono y otros compuestos.

Tabla I. 2 Normatividad de vertimientos (Decreto 1594 de 1984)

PARÁMETRO	USUARIO EXISTENTE	USUARIO NUEVO
pH	5 a 9 Unidades	5 a 9 Unidades
Temperatura	< 40 °C	< 40 °C
Material Flotante	Ausente	Ausente
Grasas y aceites	Remoción >80% en carga	Remoción >80% en carga
Sólidos Suspendidos	Remoción >50% en carga	Remoción >80% en carga
DBO	Remoción >20% en carga	Remoción >80% en carga
Fuente: Decreto 1594 de 1984		

TRATAMIENTO

Con el fin de realizar un tratamiento tendiente a cumplir con la normatividad nombrada anteriormente, se hace necesario realizar una remoción superior al 80% de la carga de los sólidos suspendidos, las grasas y los aceites, y el DBO, al mismo tiempo que se disminuyen los contenidos de metales pesados (provenientes principalmente de los aceites usados) presentes en las aguas residuales.

El tratamiento de las aguas residuales de sentinas de los barcos inicia en el momento en que se realiza la separación agua-aceite por medio de procesos de decantación, rompimientos de emulsiones, y centrifugación.

El agua resultante de estos procesos, debe ser recolectada en un tanque para realizar posteriores tratamientos con el fin de efectuar la remoción mencionada. El establecimiento del proceso de tratamiento de aguas o el diseño de la planta como tal no está dentro de los alcances del presente trabajo, sin embargo por medio de revisiones bibliográficas y asesoría de expertos en el tema, se sugieren los procesos de tratamiento comúnmente realizados a las aguas residuales industriales:

Pre-tratamiento

Neutralización: Tratamiento químico que consiste en el ajuste del pH por medio de la adición de un ácido o un álcali al residuo para obtener un rango de pH cercano a 7, con el fin de garantizar que los productos químicos empleados posteriormente puedan actuar de manera eficaz.

Tratamiento Primario

Tratamiento físico que consiste en reducir la materia suspendida, remover turbiedad orgánica e inorgánica, compuestos químicos suspendidos, entre otros contaminantes.

Un primer tratamiento primario se denomina coagulación-floculación y para este procedimiento, se hace necesario realizar ensayos de laboratorio para determinar el coagulante o los coagulantes más apropiados para el tratamiento.

Posteriormente, el agua se pasa por un filtro de Carbón activado (especial para retención de metales pesados) o de antracita para retirar contaminantes.

Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario se realiza principalmente con la intención de potabilizar el agua, se realiza por medio de tratamientos biológicos y desinfecciones para destruir o convertir en inofensivos los microorganismos patógenos. Como la idea del tratamiento de las aguas residuales no consiste en potabilizarla, este tratamiento puede no ser considerado.

La determinación de los parámetros para la medición de los contaminantes se debe hacer mediante análisis de laboratorio realizados a muestras de agua del efluente y al afluente al sistema de tratamiento, se calculan las remociones reales y se verifica el cumplimiento de la norma, en caso de no cumplirse, se repite el procedimiento.

ANEXO J. COTIZACIÓN DE EQUIPOS



Bucaramanga, 22 de Julio de 2.011

INGENIERA:
DIANA FERNANDA GALVIS
e-mail: Diana.f.galvis.c@gmail.com
Mo vil; 301 7544625.
Ciudad.

REF. COTIZACION DE EQUIPOS Y RECIPIENTES CONTENEDORES MONTAJE PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SENTINA.

Respetada Ing. GALVIS,

Reciba un cordial saludo, en atención a su amable solicitud nos permitimos cotizar LA FABRICACION SUMINISTRO MONTAJE Y PUESTA EN SERVICIO DE EQUIPOS, RECIPIENTES CONTENEDORES Y MONTAJE PARA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SENTINA, EN LA CIUDAD DE CARTAGENA COLOMBIA, según las capacidades, especificaciones y diseño de planta y equipos descrito a continuación:

1. RECIPIENTES CONTENEDORES TIPO TANQUES SILO PARA RECEPCION DE SENTINA:

- CAPACIDAD EFECTIVA: Volumen 100.000 litros, Cantidad Dos Unidades.
- MATERIALES: Construido totalmente en acero inoxidable tipo AISI 304. Anillos de refuerzo en la parte inferior en acero al carbón con cartelas de refuerzo tipo A-36. En lamina cal 3/8" (9 mm) los anillos verticales de acero inoxidable, tapa superior calibre 9 mm y fondo en lamina cal 12 mm de acero inoxidable.
- DIMNESIONES: Diámetro 3400 mm, Altura total 12.000 mm.
- ESCALERAS DE INSPECCION: Una interna y otra externa con guardas de seguridad de tipo marinero.
- MAN-HOLE: Uno en la parte inferior con placa de refuerzo. Otro en la parte superior con tornillos y empaque.
- BOLLA DE NIVEL: Flotante en la parte interna del tanque con guaya y trompo de indicación externo.



- NORMA DE FABRICACION: Diseñados y contruidos bajo norma internacional ASME V III DIV 1, En Acero Inoxidable tipo AISI 304, con acabados de tipo satinado interno y externo en las juntas soldadas.
- SOLDADURAS POR MEDIO DE PROCESO TIG. ARGON.
- TAPA SUPERIOR: De tipo torisferica, con guarda de seguridad y guardapiés.
- BRIDAS Y CONEXIONES A BOMBA DE TIPO SLIPON DE DIAMETRO 3" NPT.

VALOR UNITARIO: \$ 270'000.000.00

CANTIDAD: 2

SUBTOTAL: \$ 540'000.000.00 (Quinientos Cuarenta Millones de Pesos M/cte).

2. RECIPIENTE CONTENDOR PARA AGUAS RESIDUALES:

- CAPACIDAD EFECTIVA: Volumen 100.000 litros, Cantidad Uno.
- MATERIALES: Construido totalmente en acero inoxidable tipo AISI 304. Anillos de refuerzo en la parte inferior en acero al carbón con cartelas de refuerzo tipo A-36. En lamina cal 3/8" (9 mm) los anillos verticales de acero inoxidable, tapa superior calibre 9 mm y fondo en lamina cal 12 mm de acero inoxidable.
- DIMNESIONES: Diámetro 4500 mm, Altura total 7.000 mm.
- ESCALERAS DE INSPECCION: Una interna y otra externa con guardas de seguridad de tipo marinerio.
- MAN-HOLE: Uno en la parte inferior con placa de refuerzo. Otro en la parte superior con tornillos y empaque.
- BOLA DE NIVEL: Flotante en la parte interna del tanque con guaya y trompo de indicación externo.
- NORMA DE FABRICACION: Diseñados y contruidos bajo norma internacional ASME V III DIV 1, En Acero Inoxidable tipo AISI 304, con acabados de tipo satinado interno y externo en las juntas soldadas.
- SOLDADURAS POR MEDIO DE PROCESO TIG. ARGON.
- TAPA SUPERIOR: De tipo torisferica, con guarda de seguridad y guardapiés.
- CONEXIONES POR MEDIO DE TUBERIA DE ACERO INOXIDABLE TIPO AISI 304 SCH 40 DIAMETRO 3".

VALOR UNITARIO: \$ 256'000.000.00

CANTIDAD: 1

SUBTOTAL: \$ 256'000.000.00 (Doscientos Cincuenta y seis Millones de Pesos M/cte).



3. TANQUE ALMACENAMIENTO DE PRODUCTO COMBUSTIBLE.

- CAPACIDAD EFECTIVA: Volumen 100.000 litros, Cantidad uno.
- MATERIALES: Construido totalmente en acero inoxidable tipo AISI 304. Anillos de refuerzo en la parte inferior en acero al carbón con cartelas de refuerzo tipo A-36. En lamina cal 3/8" (9 mm) los anillos verticales de acero inoxidable, tapa superior calibre 9 mm y fondo en lamina cal 12 mm de acero inoxidable.
- DIMENSIONES: Diámetro 4500 mm, Altura total 7.000 mm.
- ESCALERAS DE INSPECCION: Una interna y otra externa con guardas de seguridad de tipo marineró.
- MAN-HOLE: Uno en la parte inferior con placa de refuerzo. Otro en la parte superior con tornillos y empaque.
- BOLLA DE NIVEL: Flotante en la parte interna del tanque con guaya y trompo de indicación externo.
- NORMA DE FABRICACION: Diseñados y construidos bajo norma internacional ASME V III DIV 1, En Acero Inoxidable tipo AISI 304, con acabados de tipo satinado interno y externo en las juntas soldadas.
- SOLDADURAS POR MEDIO DE PROCESO TIG. ARGON.
- TAPA SUPERIOR: De tipo torisferica, con guarda de seguridad y guardapiés.
- CONEXIONES POR MEDIO DE TUBERIA DE ACERO INOXIDABLE TIPO AISI 304 SCH 40 DIAMETRO 3".

VALOR UNITARIO: \$ 256'000.000.00

CANTIDAD: 1

SUBTOTAL: \$ 256'000.000.00 (Doscientos Cincuenta y seis Millones de Pesos M/cte).

4. EQUIPO PARA CALENTAMIENTO DE SENTINA, SERPENTIN EXTERIOR PARA RECIRCULACION DE VAPOR CHAQUETA DE AISLAMIENTO EN FIBRA DE VIDRIO Y LAMINA DE RECUBRIMIENTO EN ACERO INOXIDABLE TIPO 430.

- CAPACIDAD EFECTIVA: Volumen 50.000 litros.
- MATERIALES: Construido totalmente en acero inoxidable tipo AISI 304. Anillos de refuerzo en la parte inferior en acero al carbón con cartelas de refuerzo tipo A-36. En lamina cal 3/8" (9 mm) los anillos verticales de acero inoxidable, tapa superior calibre 9 mm y fondo en lamina cal 12 mm de acero inoxidable. Serpentin de recirculación de vapor en sección media caña de tubería de diámetro igual a 3" SCH 10, con una entrada y una sola salida.



- **AGITADOR:** De paletas para barrido de producto contra la pared interior del tanque para hacer la transferencia de calor sin emulsionar el producto. Potencia del Motor reductor de tipo sin fin corona igual a 15 Hp. Variador de frecuencia para el motor eléctrico.
- **DIMNESIONES:** Diámetro 3400 mm, Altura total 6.000 mm.
- **ESCALERAS DE INSPECCION:** Una interna y otra externa con guardas de seguridad de tipo mariner.
- **MAN-HOLE:** Uno en la parte inferior con placa de refuerzo. Otro en la parte superior con tornillos y empaque.
- **BOLLA DE NIVEL:** Flotante en la parte interna del tanque con guaya y trompo de indicación externo.
- **NORMA DE FABRICACION:** Diseñados y construidos bajo norma internacional ASME V III DIV 1, En Acero Inoxidable tipo AISI 304, con acabados de tipo satinado interno y externo en las juntas soldadas.
- **SOLDADURAS POR MEDIO DE PROCESO TIG. ARGON.**
- **TAPA SUPERIOR:** De tipo torisferica, con guarda de seguridad y guardapiés.
- **CONEXIONES POR MEDIO DE TUBERIA DE ACERO INOXIDABLE TIPO AISI 304 SCH 40 DIAMETRO 3".**

VALOR UNITARIO: \$ 210'000.000.00

CANTIDAD: 1

SUBTOTAL: \$ 210'000.000.00 (Doscientos Diez Millones de Pesos M/cte).

5. CENTRIFUGA DE EXTRACCION DE LODOS:

- **CAPACIDAD:** Entre 5000 y 10.000 Lts/hr.
- **DISCOS CONCENTRICOS SOBRE EJE VERTICAL.**
- **CUERPO EN HIERRO GRIS.**
- **VELOCIDAD DE GIRO:** 12.000 RPM.

VALOR : \$ 75'000.000.00

6. TUBERIAS, BOMBAS, ACCESORIOS, VALVULAS, FILTROS:

- **MATERIAL:** Tuberías de acero inoxidable tipo AISI 304, SCH 40. Bridas de conexionado de tipo slipon, válvulas flanchadas.



- BOMBAS: De desplazamiento positivo de potencia igual a 10 Hp cada una, cantidad 3 unidades. Además con un variador de frecuencia para cada una de ellas, y protecciones térmicas anti explosión.
- MEDIDORES DE FLUJO: En línea a la entrada y salida del producto, cantidad dos unidades. De conexión tipo unión clamp de D=4" OD.
- CONEXIONADO DE TODOS LOS ELEMENTOS Y EQUIPOS.

VALOR TUBERIAS Y ACCESORIOS: \$ 89'800.000.00

7. CALDERA GENERADORA DE VAPOR: Con todos sus aditamentos y accesorios, potencia entregada 50 BHP, a una presión de 135 psi, y un flujo de 350 Kg/hr de vapor a estas condiciones. Combustible carbón mineral o dual según la selección. Marca Calderas JCT de fabricación nacional.

VALOR CALDERA: \$ 95'000.000.00

GRAN TOTAL PROYECTO: \$ 1'521.800.000.00 (UN MIL QUINIENTOS VEINTIUN MILLONES OCHOCIENTOS MIL PESOS M/CTE.)

CONDICIONES GENERALES DE VENTA

PRECIOS: Se incluye el 16 % de IVA.

FORMA DE PAGO: Se establece un 40 % de anticipo para inicio de actividades, 15 % transcurridos 45 días de inicio de actividades, 15 % transcurridos 70 días de inicio, 20 % para inicio de montaje, saldo contra-entrega.

TIEMPO DE ENTREGA: Ciento cincuenta días calendario.

GARANTIAS: Se entregara póliza de cumplimiento por buen manejo y correcta inversión del anticipo, estabilidad de la obra por un periodo de un año.

En espera de cualquier inquietud,

Atentamente,

Ing. Antonio Gutiérrez Cortes
Gerente General.