



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ACEITES LUBRICANTES USADOS PARA
QUE PUEDAN UTILIZARSE EN UN PROCESO DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA,
COMO MÉTODO PARA SU ELIMINACIÓN EN BUSCA DE MINIMIZAR LA
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL**

Ana Carolina Monterroso Juárez

Asesorado por el Ing. Juan Pablo Mazariegos Robles

Guatemala, febrero de 2012



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ACEITES LUBRICANTES USADOS PARA
QUE PUEDAN UTILIZARSE EN UN PROCESO DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA,
COMO MÉTODO PARA SU ELIMINACIÓN EN BUSCA DE MINIMIZAR LA
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL**

Ana Carolina Monterroso Juárez

Asesorado por el Ing. Juan Pablo Mazariegos Robles

Guatemala, febrero de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ACEITES LUBRICANTES USADOS PARA
QUE PUEDAN UTILIZARSE EN UN PROCESO DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA,
COMO MÉTODO PARA SU ELIMINACIÓN EN BUSCA DE MINIMIZAR LA
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANA CAROLINA MONTERROSO JUÁREZ
ASESORADO POR EL ING. JUAN PABLO MAZARIEGOS ROBLES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

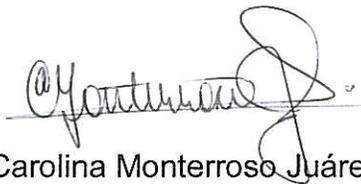
DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADORA	Ing. Hilda Piedad Palma de Martini
EXAMINADOR	Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ACEITES LUBRICANTES USADOS PARA
QUE PUEDAN UTILIZARSE EN UN PROCESO DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA,
COMO MÉTODO PARA SU ELIMINACIÓN EN BUSCA DE MINIMIZAR LA
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 13 de junio del 2011.



Ana Carolina Monterroso Juárez



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.
Edificio T-5, Ciudad Universitaria, zona 12, Guatemala, Centroamérica
Teléfono directo: (502) 2416-9118 PBX: 2416-8000 extensión 1599 Extensión 86214

Guatemala, 30 de Enero de 2012
Ref.EIQ.TG.24.2012

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el **Acta TG-01-2012-B-IF** le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de **INGENIERA QUÍMICA** a la estudiante universitaria, **Ana Carolina Monterroso Juárez**, identificada con carné No. **1994-15481**, titulado: **“DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ACEITES LUBRICANTES USADOS PARA QUE PUEDAN UTILIZARSE EN UN PROCESO DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA, COMO MÉTODO PARA SU ELIMINACIÓN EN BUSCA DE MINIMIZAR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL”**, el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico **Juan Pablo Mazariegos Robles**.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **MONTERROSO JUÁREZ**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Inga. **Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.**
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería

Guatemala, 16 de enero de 2012

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para informarle que he revisado el informe titulado: **DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ACEITES LUBRICANTES USADOS PARA QUE PUEDAN UTILIZARSE EN UN PROCESO DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA, COMO MÉTODO PARA SU ELIMINACIÓN EN BUSCA DE MINIMIZAR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL**, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Química **Ana Carolina Monterroso Juárez**, carné número 94-15481.

Por lo cual, después de haber realizado la revisión del respectivo informe final y de haber realizado las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Agradeciendo la atención a la presente,

Atentamente,



Juan Pablo Mazariegos Robles
Ingeniero Químico, Colegiado No. 799



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **ANA CAROLINA MONTERROSO JUÁREZ** titulado: **"DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ACEITES LUBRICANTES USADOS PARA QUE PUEDAN UTILIZARSE EN UN PROCESO DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA, COMO MÉTODO PARA SU ELIMINACIÓN EN BUSCA DE MINIMIZAR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; C.Dr.

DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



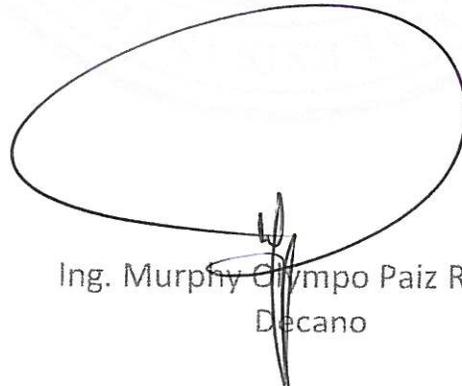
Guatemala, febrero de 2012

Cc: Archivo
WGAM/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ACEITES LUBRICANTES USADOS PARA QUE PUEDAN UTILIZARSE EN UN PROCESO DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA COMO MÉTODO PARA SU ELIMINACIÓN EN BUSCA DE MINIMIZAR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL**, presentado por la estudiante universitaria **Ana Carolina Monterroso Juárez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 28 de febrero de 2012.



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por el don de la vida, por tantas bendiciones recibidas, por darme sabiduría y permitirme culminar esta etapa.
- Virgen María** Nuestra madre en el cielo e intercesora ante nuestro Señor.
- Mis padres** Mardoqueo Monterroso (q.e.p.d.) y Dolores Juárez de Monterroso, por su amor, guía y consejos; este logro con todo mi amor para ustedes.
- Mis hermanos** Lourdes, Juan Pablo y Mardoqueo, por el cariño, apoyo y ánimos para finalizar esta etapa.
- Mi abuela** Rosa Carlota (q.e.p.d.), con todo mi cariño para usted.
- Mis sobrinos** Sofía, Alejandro y José Pablo, los quiero mucho.
- Mi cuñado** Vinicio, por su cariño y apoyo de siempre.

Mi familia

Por su cariño y alentarme siempre a seguir adelante.

Mi prometido

Luis Arturo Cerna, por su amor, espera y comprensión, para finalizar esta etapa previo a iniciar nuestro caminar juntos.

Familia Cerna Rich

Por su aprecio sincero y cariño.

Mis amigos y amigas

A cada uno, por su apoyo y cariño en las diferentes etapas de mi vida, los llevo en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por su infinito amor, guía y sabiduría para finalizar la carrera.
Virgen María	Por su amor y guía en cada etapa de mi vida.
Mis padres	Mardoqueo (q.e.p.d.) y Dolores, por el don de la vida, guía y consejos. Mami, muchas gracias por exhortarme y apoyarme en todo momento, para iniciar y finalizar esta carrera; este logro es suyo también.
Mis hermanos	Lourdes, Juan Pablo y Mardoqueo, por su apoyo de siempre.
Mis sobrinos	Por su cariño.
Mi prometido	Luis Arturo, por su amor, apoyo incondicional y por la espera.
Mi asesor	Ingeniero Juan Pablo Mazariegos, por su apoyo y asesoría.

Licenciado Sergio Santos	Por su apoyo para la realización del proyecto de graduación.
Ingenieros Williams Álvarez y Lisely de León	Por el apoyo y ánimos brindados para llegar a esta meta.
Las empresas	Que colaboraron para la realización del trabajo de graduación. Especialmente, al personal de laboratorio y talleres de servicio.
Licenciada Ingrid Benitez e Ingeniero Jorge Godínez	Por la revisión del trabajo de graduación.
Mi revisora	Licenciada Aura Mayorga, por la dedicación para la revisión del trabajo de graduación.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por el conocimiento adquirido.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTADO DE SIMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Aceite lubricante de vehículos	3
2.2. Combustible y sus propiedades	5
2.2.1. Combustible	5
2.2.2. Combustible líquido	5
2.2.2.1. Combustible líquido derivado del petróleo	6
2.2.3. Poder calorífico	6
2.2.4. Agua y sedimento	7
2.3. Fundamentos de la combustión	7
2.3.1. Principios básicos	7
2.3.1.1. Oxígeno y aire teórico para la combustión	7
2.3.1.2. Aire en exceso para la combustión	8
2.3.1.3. Productos de la combustión	9
2.3.1.4. Temperatura de la llama	9
2.3.1.5. Límites de inflamabilidad	9

2.3.1.6.	Velocidad de la llama	9
2.3.2.	Control de llama y formación de contaminantes	10
2.3.2.1.	Óxidos de nitrógeno	10
2.3.2.2.	Óxidos de azufre	11
2.3.2.3.	Monóxido de carbono	12
2.3.2.4.	Hidrocarburos no quemados	12
2.4.	Aceite usado.....	12
2.4.1.	Composición de los aceites usados y sus principales fuentes de generación	13
2.4.2.	Riesgos para la salud y el medio ambiente asociados a los aceites usados	14
2.4.3.	Destino de los aceites usados actualmente.....	15
2.5.	Alternativas de gestión de los aceites usados	16
2.5.1.	Reutilización	17
2.5.2.	Regeneración	17
2.5.3.	Valorización energética	18
2.5.4.	Destrucción en incineradores	18
2.6.	Coprocésamiento de residuos	19
2.7.	Jerarquía en la gestión de residuos.....	20
2.8.	Metales pesados	22
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	25
3.1.	Variables	25
3.2.	Delimitación del campo de estudio	25
3.3.	Recursos humanos disponibles	26
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	26
3.4.1.	Equipo	26
3.4.2.	Cristalería	27
3.4.3.	Reactivos	27

3.4.4.	Recursos físicos.....	28
3.4.5.	Técnica cuantitativa	28
3.4.6.	Recolección y ordenamiento de la información	28
3.4.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	30
3.4.8.	Análisis estadístico.....	31
4.	RESULTADOS	33
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	37
	CONCLUSIONES	45
	RECOMENDACIONES	47
	BIBLIOGRAFÍA	49
	APÉNDICES	51
	ANEXOS	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Jerarquía de gestión de residuos.....	21
2. Caracterización de metales en aceites lubricantes usados, utilizado en vehículos diesel y gasolina.....	34
3. Determinación del poder calorífico en aceites lubricantes usados, utilizado en vehículos diesel y gasolina.....	35

TABLAS

I. Análisis estadístico para los valores de poder calorífico de aceites lubricantes usados, de vehículos diesel y gasolina.....	32
II. Porcentaje de agua en aceites lubricantes.....	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HNO₃	Ácido nítrico
Al	Aluminio
Sb	Antimonio
As	Arsénico
Ba	Bario
Be	Berilio
B	Boro
Cd	Cadmio
Cal	Calorías
Co	Cobalto
Cr	Cromo
DLD	Debajo del límite de detección
CO₂	Dióxido de carbono
Sn	Estaño
GJ	Giga Joules
GJ/ton	Giga Joules por tonelada
°C	Grados Celsius
g/cm³	Gramos por centímetro cúbico
HAPs	Hydrocarbons aromatic polycyclic
Fe	Hierro
km	Kilómetro
Mn	Manganeso

IKA	Marca del equipo
MJ	Mega Joules
MJ/ton	Mega Joules por tonelada
Hg	Mercurio
ml	Mililitros
Mo	Molibdeno
Ni	Níquel
NA	No aplica
ppm	Partes por millón
ICP	Plasma acoplado inductivamente, por sus siglas en inglés
Ag	Plata
Pb	Plomo
%	Porcentaje
Se	Selenio
SI	Sistema Internacional
Tl	Talio
Ti	Titanio
ton	Tonelada
BTU	Unidad térmica británica, por sus siglas en inglés
V	Vanadio
W	Wolframio (Tungsteno)
Zn	Zinc

GLOSARIO

Aceite usado	Cualquier aceite refinado del petróleo crudo o de origen sintético que haya sido utilizado en los motores de automóviles y vehículos de transporte, y que durante su uso se mezclaron con impurezas como tierra, partículas de metal, agua y sustancias tóxicas que lo contaminan y afectan sus características físicoquímicas y con ello su rendimiento.
Aditivo	Sustancia química agregada a los lubricantes para mejorar sus propiedades.
°API	Grados del Instituto Americano del Petróleo, por sus siglas en inglés.
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés.
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
CMPA	Combustible o materias primas alternativas.

Combustible	Sustancia que reacciona químicamente en presencia de oxígeno, generando calor, CO ₂ , agua y otros componentes.
Combustible alternativo	Alimentación de un residuo en un proceso existente que contribuye con energía y se utiliza en lugar del combustible principal.
Coprocesamiento	Incorporación de residuos en un proceso industrial previamente existente, eliminando residuos de forma eficiente y segura, recuperando al mismo tiempo energía y/o materiales que ese residuo pueda aportar en beneficio del proceso industrial al cual es incorporado.
GTZ	Agencia de Cooperación Técnico Alemana, por sus siglas en alemán.
ICP	Plasma acoplado inductivamente, por sus siglas en inglés.
Medio ambiente	Es todo lo que afecta a los seres vivos y condiciona especialmente las circunstancias de vida de las personas, abarca los seres vivos, objetos, agua, suelo, aire y las relaciones entre ellos.
Metales pesados	Grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para los seres humanos.

Poder calorífico	Cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación.
PROARCA	Programa Ambiental Regional para Centroamérica.
REBRAMAR	Red Brasileira de Manejo Ambiental de Resíduos.
REPAMAR	Red Panamericana de Manejo Ambiental de Resíduos.

RESUMEN

Durante las últimas décadas en Guatemala y en varios países del mundo se ha incrementado la utilización de aceites lubricantes usados como un combustible alternativo en procesos de combustión industrial, debido a las propiedades fisicoquímicas que estos presentan, en comparación con los combustibles tradicionales.

En varios de estos países existe regulación para su manejo como combustible alternativo, sin embargo, en Guatemala aún no se cuenta con una regulación sobre el tema.

Partiendo de la ausencia de normativa en Guatemala, el presente trabajo de graduación se enfocó en brindar a la industria guatemalteca una determinación del contenido de agua, caracterización de metales pesados presentes y determinación del poder calorífico, en los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina, para que puedan utilizarse en un proceso de valorización energética como una opción de eliminación en busca de minimizar la contaminación ambiental, tomando como referencias, normativas internacionales.

OBJETIVOS

General

Determinar si los aceites lubricantes usados de vehículos automotores diesel y gasolina, al ser utilizados en procesos de combustión industrial contaminan el medio ambiente.

Específicos

1. Determinar el contenido de agua en los aceites lubricantes usados, de vehículos automotores diesel y gasolina, por titulación.
2. Caracterizar metales pesados en aceites lubricantes usados de vehículos automotores diesel y gasolina, por espectroscopía de emisión atómica.
3. Determinar el poder calorífico en aceites lubricantes usados de vehículos automotores diesel y gasolina, mediante calorimetría.
4. Describir si el utilizar aceites lubricantes usados en procesos de combustión industrial en condiciones no adecuadas, contamina el medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha incrementado el interés en la energía provista por los aceites lubricantes usados, siendo estos utilizados en procesos de combustión industrial; interés también desarrollado en trabajos de graduación previos, lo cual motivó a continuar con algunas de las recomendaciones de dichos trabajos para brindar a la industria guatemalteca una alternativa de eliminación de los aceites lubricantes usados de vehículos automotores diesel y gasolina, en un proceso de valorización energética, minimizando así los impactos al medio ambiente.

El desarrollo del trabajo de graduación titulado: “Definición de las características de aceites lubricantes usados para que puedan utilizarse en un proceso de valorización energética, como método para su eliminación en busca de minimizar la contaminación ambiental” tuvo como fin, determinar el contenido de agua, caracterizar los metales pesados presentes y determinar el poder calorífico, en aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina, para así brindar a la industria guatemalteca información relevante para que pueda ser tomada en consideración antes de utilizar los aceites lubricantes usados, como sustituto del combustible primario en condiciones de operación no adecuadas.

En el capítulo uno, se describieron los trabajos previos que se han realizado en relación con el tema del trabajo de graduación. Luego se continuó con una breve descripción de los aceites lubricantes; combustibles y sus propiedades; de los fundamentos de la combustión, variables que deben monitorearse; así como de los aceites usados y las alternativas de gestión de los mismos.

Posteriormente, se continuó con la descripción del diseño metodológico desarrollado en este trabajo, para finalmente mostrar los resultados de los análisis realizados, así como su interpretación.

1. ANTECEDENTES

Los aceites lubricantes usados son residuos que se generan diariamente en muchas actividades productivas del país, estos han sido de especial interés en los últimos años debido a sus características fisicoquímicas para ser utilizados como combustible alternativo y por los efectos negativos que pudieran ocasionar al medio ambiente.

En Guatemala en 1999, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, se realizó el trabajo de graduación titulado “Consideraciones ambientales para el control y manejo de lubricantes usados y sustancias oleosas”, dicho trabajo de graduación fue realizado por el ingeniero Daniel Armando Cortez Argueta, de la Escuela de Ingeniería Civil, en el cual se evaluó la situación actual (año 1999) referente a la recolección, transporte, disposición y comercialización de los aceites lubricantes usados y las mezclas oleosas en Guatemala.

En el 2001, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, se realizó el trabajo de graduación titulado “Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los aceites usados como combustible alterno”, realizado por el ingeniero Aldo Alexander Portillo Nájera, de la Escuela de Ingeniería Química, el cual tuvo por objetivo caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los aceites lubricantes usados para verificar si pueden ser usados como combustible alternativo del bunker C, realizando una caracterización de la gravedad $^{\circ}$ API, viscosidad, porcentaje de agua y sedimentos, punto de inflamación, porcentaje de cenizas, calor de combustión, porcentaje de azufre y partes por millón de Vanadio en aceites lubricantes usados.

En el 2002 se realizó una “Revisión y análisis de las experiencias de Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador y México respecto de los cinco elementos claves para el manejo ambiental de lubricantes usados”, realizado por el consultor Pedro Ubiratan Escorel de Azevedo, en conjunto con REPAMAR, Rebramar, CEPIS y GTZ. En dicho estudio se realizó una comparación de las experiencias de cada país (en los cuales existe una legislación específica para los aceites lubricantes usados).

En Guatemala, en el 2004, el Centro Guatemalteco de Producción Más Limpia en conjunto con el Programa Ambiental Regional para Centroamérica, (PROARCA) publicó el “Reporte nacional de manejo de residuos en Guatemala, residuo: aceites usados de motor e hidroneumáticos”, en el cual se describen las generalidades del aceite lubricante usado, los impactos que tiene al medio ambiente, los efectos en la salud de las personas, así como las tecnologías disponibles para el manejo adecuado del residuo, entre otros aspectos.

En el 2007 en Chile, fue publicada la “Guía técnica para generadores de aceites industriales usados” proyecto realizado por la Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile y la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ por sus siglas en alemán) en la cual se presentaron, entre otros puntos, las pautas a seguir para el manejo de aceites usados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aceite lubricante de vehículos

Los aceites lubricantes están formados por una base, la cual proporciona las características lubricantes primarias, y por aditivos, utilizados para aumentar su rendimiento, eficiencia y vida útil. Según la formulación del aceite, la base puede ser mineral (proveniente del petróleo crudo) o sintética (síntesis a partir de productos químicos).

Las bases minerales se extraen de los procesos de refinación del crudo de petróleo; sus características están determinadas por la fuente del crudo y el proceso específico de refinación usado. Estas bases están constituidas por una gran variedad de compuestos orgánicos, siendo en su gran mayoría, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). Según la naturaleza del crudo de petróleo, se dividen en parafínicos, nafténicos y aromáticos, siendo el comportamiento de la viscosidad ante el aumento de temperatura más estable para los parafínicos que para los nafténicos.

Las bases sintéticas son extraídas por procesos especiales (distintos a la refinación) y están formados por componentes de bajo peso molecular que por reacción química se transforman en fluidos de más alto peso molecular. Las principales bases son: ésteres carboxílicos, ésteres de polio, polialfaolefinas, polialquilenglicoles, ésteres del ácido fosfórico, polímeros de silicona, polímeros fluorados o clorados.

Las ventajas principales del uso de bases sintéticas comparadas con las bases minerales en aceites lubricantes son: amplio rango de temperaturas de operación, mayor resistencia a la oxidación, ahorro de energía, mantenimiento con menor frecuencia, menor uso de aditivos y más fácil degradación.

La base para aceites lubricantes debe estar acompañada de aditivos para que no se degrade rápidamente. Los aditivos son compuestos químicos que se agregan entre un 15 y 20% en volumen a los aceites mejorando sus propiedades físicas o químicas, para una mejor adaptación a la función que se les encomienda. Algunos tipos de aditivos utilizados son: inhibidores de corrosión, detergentes y dispersantes, antioxidantes, antidesgaste, antiespumantes, reductores del punto de fluidez y aditivos para presiones extremas.

El aceite lubricante para motores cumple varias funciones básicas para poder proporcionar una lubricación adecuada, entre ellas se puede mencionar: mantiene el motor limpio y libre de herrumbre y corrosión, actúa como refrigerante y sellante, y proporciona una película que reduce el contacto de metal contra metal y por lo tanto, la fricción y el desgaste. Sin embargo, los esfuerzos de una aplicación determinada y las condiciones especiales en las que se utiliza el aceite, son las que determinarán en gran parte las otras funciones que debe de realizar el aceite lubricante.

Para seleccionar el aceite lubricante apropiado se deben tener en cuenta los requerimientos del motor, la aplicación en la que se va a utilizar y la calidad de combustible disponible. Para que en determinadas condiciones el aceite pueda ejercer sus propiedades de lubricación y protección, hay que considerar también los aditivos en el aceite, pues las características finales de rendimiento dependen del aceite base y de los aditivos.

2.2. Combustible y sus propiedades

A continuación se definirá qué es un combustible y sus propiedades.

2.2.1. Combustible

Se denomina combustible a cualquier sustancia que al reaccionar químicamente con otra, produce calor, liberando energía de su forma potencial, a una forma utilizable directamente como energía térmica y/o energía mecánica, dejando como residuo calor (energía térmica).

Los combustibles generalmente se utilizan para elevar temperaturas, para generar vapor, con el propósito de obtener calor y energía; para proporcionar energía a motores de combustión interna y como fuente directa de energía en vehículos.

Las reacciones químicas de la combustión suponen la combinación del oxígeno con el carbono, hidrógeno o azufre presentes en los combustibles. Los productos finales son dióxido de carbono, agua y dióxido de azufre. Las demás sustancias presentes en los combustibles no contribuyen a la combustión, pero son expulsadas de las cámaras en forma de vapor o permanecen después de la combustión en forma de ceniza.

2.2.2. Combustible líquido

Existen dos tipos de combustibles líquidos: los no derivados del petróleo, entre los que se encuentran los derivados del carbón, las arenas y pizarras bituminosas; y los derivados del petróleo, que se describen a continuación.

2.2.2.1. Combustible líquido derivado del petróleo

Los principales combustibles líquidos que se derivan del petróleo se obtienen mediante la destilación fraccionada del petróleo crudo (una mezcla de hidrocarburos y derivados de hidrocarburos que se encuentran en el intervalo, desde el metano hasta compuestos bituminosos pesados).

Entre ellos se encuentra el fuel oil No. 6 o bunker C, el cual es un combustible residual que se obtiene de la destilación del petróleo, siendo el combustible más pesado que se puede destilar a presión atmosférica; su poder calorífico mínimo es de 40 GJ/t, posee un alto contenido de azufre y ciertas impurezas (agua y sedimentos), por lo que requiere de precalentamiento previo a su empleo, ya que es comúnmente utilizado como combustible para generación de energía eléctrica, en hornos y calderas.

2.2.3. Poder calorífico

Es una de las características principales de los combustibles, el poder calorífico es el calor producido, a volumen constante, por la combustión completa de una cantidad unitaria de carbón en un calorímetro de bomba de oxígeno en condiciones específicas.

En el Sistema Internacional (SI) se miden en joule por kilogramo; aunque usualmente, ya que el joule es una unidad muy pequeña, se miden en Gigajoule por tonelada.

2.2.4. Agua y sedimento

Las dos impurezas que comúnmente se encuentran dentro de los combustibles son el agua y el sedimento; existen diferentes métodos para su determinación, el método comúnmente utilizado para determinar ambas impurezas en combustibles es el realizado por centrifugación (ASTM D 96); si lo que se requiere es determinar el porcentaje de agua en combustibles, el método utilizado es por destilación (ASTM D 95) y para determinar el agua en aceites lubricantes usados, por ser un residuo, se determina por titulación de Karl Fischer.

2.3. Fundamentos de la combustión

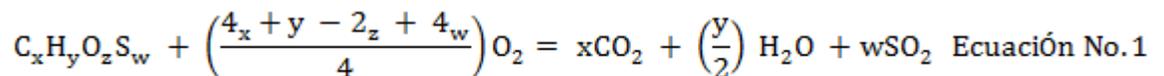
A continuación se definirán los fundamentos de la combustión.

2.3.1. Principios básicos

Entre los principios de la combustión se tienen:

2.3.1.1. Oxígeno y aire teóricos para la combustión

La cantidad de oxígeno (oxígeno o aire) que es óptima para quemar el carbono, el hidrógeno y el azufre en un combustible, para obtener dióxido de carbono, vapor de agua y dióxido de azufre, es el requerimiento teórico o estequiométrico de oxígeno o de aire. La reacción química para la combustión completa de un combustible es:



Siendo x, y, z y w el número de átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre, respectivamente, en el combustible.

El volumen de oxígeno teórico (a 0,101 MPa y 298K) que se requiere para quemar cualquier combustible, se puede calcular a partir del análisis elemental del combustible de la siguiente manera:

$$24,45 \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} + \frac{S}{32} \right) = m^3 O_2 / Kg \text{ Combustible} \quad \text{Ecuación No. 2}$$

Donde C, H, O y S son los pesos, en tanto, por uno de estos elementos, en 1 kg de combustible. La masa de oxígeno (en kg) que se necesita se puede obtener mediante la multiplicación del volumen por 1,31.

2.3.1.2. Aire en exceso para la combustión

Con el fin de obtener una combustión completa, en la práctica se requiere una cantidad de aire superior a la teórica. Este aire en exceso se expresa como porcentaje respecto de la cantidad de aire teórica. La razón de equivalencia se define como la razón entre la razón real combustible-aire y la razón estequiométrica entre ambas cantidades. Los valores de la razón de equivalencias inferiores a 1,0 corresponden a mezclas pobres en combustible, de manera inversa; los valores superiores a 1,0 corresponden a mezclas ricas en combustibles.

2.3.1.3. Productos de la combustión

Para mezclas pobres, los productos de combustión de un combustible que no contiene azufre, están formados por dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno, oxígeno y posiblemente pequeñas cantidades de monóxido de carbono y de hidrocarburos no quemados. En el caso de combustibles sólidos y líquidos, los productos de combustión pueden incluir también residuos sólidos que contengan ceniza y partículas de carbón no quemadas.

2.3.1.4. Temperatura de la llama

El calor que desprende la reacción química entre el combustible y el oxidante, calienta a los productos de combustión. El calor se transmite desde los productos de combustión, principalmente mediante radiación y convección hacia el entorno, y la temperatura resultante en la zona de reacción es la temperatura de la llama. Si no hay transmisión de calor hacia el entorno, la temperatura de llama es igual a la temperatura de llama teórica o adiabática.

2.3.1.5. Límites de inflamabilidad

Para que se pueda formar una llama de forma autosostenida, existen dos límites de inflamabilidad para las mezclas combustible-aire o combustible-oxígeno: el superior (o rico) y el inferior (o pobre).

2.3.1.6. Velocidad de llama

Se define como velocidad de llama, a la velocidad relativa respecto del gas no quemado, a la que una llama adiabática se propaga, en dirección normal a sí misma, a través de una mezcla homogénea de gas.

Está relacionada con la velocidad de la reacción de combustión, y es primordial para determinar los límites de retroceso de la llama y de soplado de la misma en un quemador.

En un quemador con premezcla, si la velocidad de la mezcla en el portador de llama es inferior a la velocidad de la misma, la llama puede retroceder a través del portador de la misma, e inflamar la mezcla detrás de la cabeza del quemador.

De manera inversa, si la velocidad de la mezcla es significativamente superior que la velocidad de la llama, esta puede no mantenerse pegada al portador de llama y entonces se dice que se sopla del mismo.

La velocidad de la llama depende primordialmente de la razón combustible-aire, pasando de ser prácticamente cero en el límite pobre de inflamación, hasta alcanzar un máximo y volver a ser prácticamente cero en el límite rico de inflamabilidad.

2.3.2. Control de llama y formación de contaminantes

Los contaminantes más importantes del aire que se generan en la combustión incluyen los óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (principalmente SO_2), materia sólida en partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados.

2.3.2.1. Óxidos de nitrógeno

Existen tres vías de reacción, cada una con características particulares, que son responsables de la formación de NO_x , durante los procesos de

combustión: NO_x térmico, que se forma por la combinación de nitrógeno y oxígeno atmosféricos a temperaturas elevadas; NO_x del combustible, que se forma por la oxidación del nitrógeno ligado al combustible, y NO_x instantáneo, que se forma por reacción de fragmentos de hidrocarburos derivados del combustible con el nitrógeno atmosférico. NO_x se refiere usualmente a la suma de $\text{NO} + \text{NO}_2$. El NO es la forma más importante en los productos de combustión. El NO se oxida posteriormente a NO_2 en la atmósfera.

Control de emisiones NO_x : es preferible minimizar la formación de NO_x , mediante el control de los procesos de mezclado, combustión y transmisión de calor, que hacerlo a través de técnicas posteriores a la combustión, tales como la reducción catalítica selectiva.

2.3.2.2. Óxidos de azufre

El azufre puede estar presente en los combustibles en forma de minerales inorgánicos, estructuras orgánicas, sales de sulfato y azufre elemental.

El contenido de azufre va desde ppm en gas natural suministrado por tubería, algunas décimas de porcentaje en aceite diesel y fuelóleos ligeros, hasta 0,5 a 5% en los fuelóleos pesados y los carbones.

Los compuestos de azufre se pirolizan durante la fase de volatilización, de la combustión de aceite y de carbón, reaccionando en fase gaseosa para formar en su mayoría SO_2 y algo de SO_3 .

La conversión del azufre en los combustibles a estos óxidos es generalmente elevada (85 a 90 por 100), y generalmente es independiente de las condiciones de la combustión.

2.3.2.3. Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es un producto intermedio clave en la oxidación de todos los hidrocarburos. En un sistema de combustión que se encuentre bien ajustado, casi todo el CO se oxida a CO₂, con lo que la emisión del primero es muy baja (unas pocas ppm).

2.3.2.4. Hidrocarburos no quemados

Las llamas de hidrocarburos pueden emitir especies de los mismos que estén sin quemar. Por lo general hay dos clases de hidrocarburos no quemados: moléculas pequeñas que son productos intermedios de la combustión (por ejemplo, formaldehído), y moléculas más grandes que se forman por pirosíntesis en zonas calientes y ricas en combustibles dentro de las llamas (por ejemplo, benceno, tolueno, xilenos y varios hidrocarburos aromáticos policíclicos).

En un sistema bien ajustado de combustión, la emisión de estos hidrocarburos no quemados es extremadamente baja (típicamente, partes por trillón a partes por billón). Sin embargo, la emisión de ciertos hidrocarburos no quemados puede preocupar en sistemas que estén mal diseñados o mal ajustados.

2.4. Aceite usado

Aceite usado es “cualquier aceite refinado del petróleo crudo o de origen sintético que haya sido utilizado en los motores de automóviles y vehículos de transporte, y que durante su uso se mezclaron con impurezas como tierra, partículas de metal, agua y sustancias tóxicas que lo contaminan y afectan sus

características fisicoquímicas y con ello su rendimiento”.¹ Entre sus componentes tiene diversos elementos contaminantes, tal es el caso de aditivos como el zinc, cadmio, aluminio, cloro, fósforo, azufre entre otros, que se añaden al aceite base para conferirle estabilidad, durabilidad y potenciar su calidad lubricante.

2.4.1. Composición de los aceites usados y principales fuentes de generación

Los aceites lubricantes son productos de uso general, siendo demandados por el sector privado, sector industrial y empresas de servicio, principalmente de transporte; los aceites lubricantes usados, durante su periodo de utilización o vida útil, adquieren concentraciones elevadas de diversas impurezas, dentro de estas impurezas destacan los metales pesados como cadmio, cromo, arsénico y zinc.

Frecuentemente al realizar análisis de laboratorio a los aceites lubricantes usados se encuentran solventes clorados tales como tricloroetano, tricloroetileno y percloroetileno, provenientes del proceso de refinación del petróleo y de la reacción del aceite con compuestos halogenados de los aditivos. Otros contaminantes presentes son el azufre y hollín, generados en la combustión.

La pérdida de las características de los aceites lubricantes de motor se debe especialmente a una reacción de oxidación. En todos los casos, como consecuencia de su utilización, se degradan perdiendo las cualidades que les

¹ CENTRO GUATEMALTECO DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA. Reporte nacional de manejo de residuos en Guatemala. p. 1.

hacían operativos y se hace necesaria su sustitución, generándose un residuo que puede variar de una muestra a otra, dependiendo de la procedencia.

Este trabajo de graduación centró la atención en los aceites lubricantes de vehículos diesel y gasolina, en el cual se estimó que la vida útil del aceite lubricante es equivalente a 5 000 km.

2.4.2. Riesgos para la salud y el medio ambiente asociados a los aceites usados

Algunos de los compuestos orgánicos que se encuentran presentes en las bases de los aceites nuevos (HAPs), los aditivos que contienen y los contaminantes que acumulan durante su uso, hacen que estos residuos contengan sustancias perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente.

Las condiciones de riesgo y perjuicios hacia la salud humana, comúnmente encontrados son: una exposición prolongada y repetida a gases de compuestos orgánicos (aldehídos, cetonas...), compuestos aromáticos (HAPs, tolueno, benceno), metales pesados y otras sustancias (disolventes halogenados, compuestos sulfurados...) presentes en los aceites usados, que de un modo u otro son arrojados a la atmósfera, son componentes muy dañinos que pueden provocar desde pequeñas afecciones sobre el sistema respiratorio (bronquitis, asma, asfixia) hasta efectos cancerígenos y mutagénicos en distintos órganos debido a su carácter irritante y tóxico. Se recomienda mantenerlos lejos del contacto con la piel y los ojos y evitar la ingestión o la inhalación de los vapores o neblinas.

De acuerdo con la Guía Técnica para Generadores de Aceites Industriales Usados, las condiciones de riesgo y perjuicios hacia el medio ambiente comúnmente encontrados son:

- Aire: su eliminación mediante combustión incontrolada origina graves problemas de contaminación atmosférica producida por gases de combustión proveniente de compuestos de cloro, fósforo y azufre, y por productos de la combustión incompleta de compuestos orgánicos presentes en los aceites usados.
- Agua: los aceites usados forman finas películas impermeables en la superficie de los cursos del agua y debido su insolubilidad no permiten el paso de oxígeno a través de ella, produciendo la muerte de organismos que la pueblan. Además de tener efectos tóxicos diversos para organismos de agua dulce y marinos, este tipo de contaminación puede inutilizar cursos de agua que sirven como fuentes de agua potable.
- Suelo: los hidrocarburos saturados no biodegradables que componen el aceite usado en contacto con el suelo destruyen el humus vegetal, y por tanto la fertilidad del suelo, y generan la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

2.4.3. Destino de los aceites usados actualmente

Los aceites usados son dispuestos frecuentemente en forma inadecuada en el suelo, aire y agua, ya sea lanzado directamente en los sistemas de alcantarillado, quemados en procesos de combustión inadecuados y vertido a campo abierto como impermeabilizante y supresor de polvo o como

antioxidante para las piezas de metal y lubricación de bajo costo para maquinaria.

En el transcurso de los últimos años se han incrementado las actividades de recolección y reutilización de aceites lubricantes usados; estas actividades han sido dominadas por pequeños intermediarios sin preparación técnica ni medios para un eficaz tratamiento, acopio y traslado.

Este mercado paralelo de recolección y reutilización sin tratamiento de los aceites usados y sin legislación nacional, ha incrementado la utilización no adecuada del aceite usado al revenderlo principalmente para la quema en lugares como caleras artesanales, calderas, hornos de cerámica, pequeñas fundidoras y aquellos lugares donde se requiera un combustible de alto valor energético, en donde las temperaturas no son controladas, por lo que no existe seguridad que las emisiones sean inocuas.

En otros casos, las aceiteras recuperan el aceite lubricante usado y lo filtran en forma artesanal para su reutilización como lubricante de bajo costo en los automóviles.

2.5. Alternativas de gestión de los aceites usados

De acuerdo con los principios de jerarquía de gestión de residuos (figura 1), es preferible reacondicionar los aceites usados, siempre y cuando su composición química lo permita.

Cuando por factores tecnoeconómicos no resulte factible el reacondicionamiento de aceites usados, se pueden eliminar a través de la

regeneración y cuando esta no sea viable los aceites usados serán eliminados a través de la valorización energética.

A continuación se presentan cuatro alternativas de gestión para los aceites usados, ordenadas de acuerdo con principios ambientales, las cuales son descritas en la Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos, del Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe:

2.5.1. Reutilización

La reutilización en otros usos, como aceite de maquinaria de corte o en sistemas hidráulicos, siempre que la calidad del aceite usado lo permita o previo tratamiento para remoción de contaminantes insolubles y productos de oxidación, mediante calentamiento, filtración, deshidratación y centrifugación.

2.5.2. Regeneración

Es posible la recuperación material de las bases lubricantes presentes en el aceite original, mediante distintos tratamientos, de manera que resulten aptas para su reformulación y utilización. Casi todos los aceites usados son regenerables, aunque en la práctica la dificultad y el costo hacen inviable esta alternativa para aceites usados con alto contenido de aceites sintéticos, agua y sólidos.

2.5.3. Valorización energética

La valorización energética del aceite usado mezclado con fuel oil (en calderas industriales y hornos de cemento) ya sea por combustión directa o con pretratamiento del aceite (separación de agua y sedimentos). El aceite se constituye en uno de los residuos con mayor potencial para ser empleado como combustible por su elevado poder calorífico. Aunque la mayoría de las calderas domésticas, comerciales e industriales de baja potencia de generación, pueden utilizar aceites usados, es una práctica no recomendable debido al problema de contaminación potencial del aire, por tratarse de productos sin control de especificaciones, bajo condiciones no controladas y sin tratamiento de emisiones, especialmente por el contenido de metales pesados.

2.5.4. Destrucción en incineradores

La destrucción en incineradores de residuos peligrosos, en los casos que los aceites usados presenten niveles de contaminantes de metales pesados o halógenos que no permitan la sustitución de combustible en hornos o calderas industriales.

Esta priorización de cuatro alternativas descritas, se basa en las ventajas ambientales de los procesos actuales de regeneración, por su mayor ahorro de materias primas, menores emisiones y olores, así como la menor producción de residuos o efluentes. Sin embargo se debe tener en cuenta que todavía coexisten procesos de regeneración que son muy contaminantes, frente a lo cual la opción de valorización energética puede ser más conveniente.

2.6. Coprocesamiento de residuos

De acuerdo con el documento: Coprocesamiento, una oportunidad: el coprocesamiento en hornos es una técnica que permite la eliminación segura de los residuos industriales y al mismo tiempo, el aprovechamiento de las características térmicas o químicas que esos residuos puedan aportar en beneficio del proceso productivo.

“Es importante establecer que por residuos se entiende cualquier sustancia u objeto - sólido, líquido o pastoso - cuyo generador desecha o quiere desechar, o bien, que tiene que ser tratado para proteger la salud pública o el ambiente”.²

Algunos ejemplos de residuos y materiales que pueden ser coprocesados son los plásticos, papeles, gomas, neumáticos residuales, aceites y solventes usados, residuos de biomasa (por ejemplo: residuos de madera no tratada, lodos secos de aguas residuales), residuos de telas, lodos industriales, aserrín impregnado, solventes residuales, pesticidas obsoletos, medicamentos vencidos, y sustancias químicas, entre otros; respetando la jerarquía de gestión de residuos.

Los residuos tienen diferentes formas y características. Algunos de ellos no pueden usarse directamente como lo que se denomina Combustibles o Materias Primas Alternativas (CMPA), sino que deben previamente, someterse a un proceso de preparación, que se denomina preprocesamiento.

² GTZ., CEMENTOS POLPAICO, S.A., CEMENTOS BIO BIO, S.A., LAFAGE CEMENTOS. Co-procesamiento, una oportunidad. p. 21.

Este paso genera un material, con características bien definidas, que cumple tanto con las normas ambientales, así como también con las especificaciones técnicas necesarias para poder ser coprocesados en un horno.

El coprocesamiento debe respetar la jerarquía de residuos, integrarse a programas de gestión y estrategias de apoyo para la eficiencia de recursos, y nunca entorpecer los esfuerzos para minimizar los residuos. El coprocesamiento es una opción posterior a la reducción, reutilización y reciclaje, y debe asegurar que no dañará o alterará la calidad del producto de ese proceso industrial (por ejemplo: cemento, cal, vidrio, acero.)

2.7. Jerarquía en la gestión de residuos

De acuerdo con el documento Coprocesamiento: una oportunidad, la jerarquía de gestión de residuos que se detalla a continuación, debe respetarse en cualquier tipo de disposición o eliminación de residuos, incluyendo el coprocesamiento.

La jerarquía de residuos se define de la siguiente manera:

- **Prevención / minimización:** prevenir la generación de residuos es la solución óptima e ideal. Esto solo puede lograrse por medio de una estricta política de fabricación de productos que asegure que ciertos materiales no aparezcan como residuos, reduciendo su generación en términos globales.

- Reutilización y reciclaje: estas técnicas corresponden a la aplicación del concepto de Producción Limpia, como la reutilización directa y el reciclaje de materiales primarios (chatarra metálica, vidrio, papel, cartón, plásticos, etc.).
- Coprocesamiento: corresponde a la incorporación de residuos en un proceso industrial previamente existente (como la producción de cemento, por ejemplo) eliminando esos residuos de forma eficiente y segura, recuperando al mismo tiempo la energía y/o materiales que ese residuo pueda aportar en beneficio del proceso industrial al cual es incorporado. En este caso, los residuos se usan como un sustituto para energía proveniente de combustibles fósiles y reemplazo de materias primas.
- Incineración (con o sin recuperación de energía): es una tecnología enfocada a reducir los volúmenes de residuos, generando cenizas que deben ser dispuestas con base en otra tecnología de disposición o eliminación. En algunos casos, puede llegar a constituir una forma de recuperar energía.
- Relleno de seguridad – confinamiento controlado: es la última opción aceptada para disponer de residuos que no pudieron ser eliminados por las otras tecnologías.

Cuando no existe una gestión adecuada, normas establecidas o un mecanismo de control eficiente que garantice que estas se cumplan, se llega a la incineración y disposición no controlada. Es necesario acentuar que los vertederos no controlados y la incineración a cielo abierto, representan una importante amenaza para los recursos naturales, el medio ambiente y la salud humana.

En la imagen se muestra la integración del coprocesamiento en la jerarquía de los residuos:

Figura 1. **Jerarquía de gestión de residuos**



Fuente: GTZ, Cementos Polpaico, S.A., Cementos Bio Bio, S.A.,
Lafarge Cementos., Co-procesamiento, una oportunidad. p. 24.

2.8. Metales pesados

Los metales pueden dividirse en dos grupos: los metales ligeros con densidades inferiores a 4 g/cm^3 y los metales pesados con densidades por encima de 7 g/cm^3 .

Se le denomina comúnmente metales pesados a un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para los seres humanos.

No existe una definición aceptada por la comunidad científica sobre metales pesados, por lo cual, para la elaboración del presente trabajo de graduación se consideró que para una correcta aproximación hacia la definición de lo que son metales pesados, se deben individualizar sus propiedades más representativas y definirlos en términos de cada una de ellas:

- En términos de densidad (gravedad específica): un metal pesado es el que tiene una densidad de $5,0 \text{ gr/cm}^3$ o más.
- En relación con el peso atómico (masa atómica relativa): un metal pesado es aquel cuyo peso atómico es mayor que el sodio.
- En términos de la toxicidad: un metal pesado es un elemento de uso común en la industria en procesos aerobios y anaerobios, y que de forma genérica es tóxico para los seres vivos.

Muchos de los metales que tienen una densidad alta no son especialmente tóxicos y algunos son elementos necesarios en el ser humano, independientemente de que a determinadas concentraciones puedan ser tóxicos en algunas de sus formas. Sin embargo, hay una serie de elementos que en alguna de sus formas pueden representar un problema medioambiental y es común referirse a ellos con el término genérico de “metales pesados”.

Los metales pesados más conocidos son el mercurio, el plomo, el cadmio y el talio. También se suele incluir un semimetal como es el arsénico y, en raras ocasiones, algún no metal como el selenio. A veces también se habla de contaminación por metales pesados incluyendo otros elementos tóxicos más ligeros, como el berilio o el aluminio.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

- Concentración de metales pesados (ppm): parte por millón de un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para los seres humanos y el medio ambiente.
- Temperatura (°C): magnitud física fundamental que expresa el estado térmico de un sistema.
- Poder calorífico (GJ/ton): es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación.
- Porcentaje de agua y sedimentos: prueba que se realiza para determinar el contenido de agua y sedimentos en combustibles.

3.2. Delimitación de campo de estudio

La delimitación del campo de estudio del trabajo de graduación es la siguiente:

- Campo de estudio: energía alternativa
- Área de investigación: medio ambiente
- Línea de investigación: propiedades fisicoquímicas y metales pesados

3.3. Recursos humanos disponibles

Las personas que fueron necesarias para la realización del trabajo de graduación son:

- Estudiante investigador
- Asesor del trabajo de graduación
- Jefe de laboratorio
- Encargados de talleres
- Técnicos mecánicos
- Técnicos químicos
- Revisor del trabajo de graduación
- Coordinador de trabajos de graduación

3.4. Recursos materiales disponibles

3.4.1. Equipo

- Analizador plasma acoplado inductivamente (ICP por sus siglas en inglés)
- Horno microondas
- Centrífuga
- Balanza analítica
- Campana de extracción
- Equipo Karl Fischer
- Bomba calorimétrica IKA
- Termómetro
- Equipo auxiliar de laboratorio

3.4.2. Cristalería

- Agitador
- Balón volumétrico
- Pipetas
- Probeta
- Beakers
- Earlenmeyers
- Tubos de ensayo

3.4.3. Reactivos

- Ácido clorhídrico
- Ácido nítrico
- Ácido fluorhídrico
- Ácido benzoico
- Agua destilada
- Agua desmineralizada
- Argón líquido
- Gas nitrógeno
- Estándar de: antimonio, arsénico, berilio, cadmio, cobalto, cobre, cromo, estaño, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio, telurio, vanadio y zinc.

3.4.4. Recursos físicos

- Vehículos tipo diesel y gasolina
- Aceite lubricante nuevo y usado
- Material y equipo de oficina y laboratorio
- Equipo de protección personal
- Equipo para toma de muestra:
 - Recipientes
 - Mangueras
 - Embudos
 - Caja de seguridad para transporte de muestra

3.4.5. Técnica cuantitativa

El trabajo de graduación se fundamentó en la técnica cuantitativa, ya que se realizó la caracterización de propiedades fisicoquímicas y de metales pesados en aceites lubricantes usados de vehículos automotores diesel y gasolina, obteniendo valores puntuales para cada una de las muestras analizadas.

3.4.6. Recolección y ordenamiento de la información

Se tomaron muestras de aceite lubricante usado de vehículos automotores diesel y gasolina en el momento en que los mismos se encontraban en el taller de servicio para que se realizara un servicio mecánico, el cual incluye cambio de aceite lubricante.

Este procedimiento se realizó veinte veces para vehículos gasolina y once para vehículos diesel.

La decisión sobre el tamaño de la muestra se realizó para un universo finito de 55 vehículos gasolina y 30 vehículos diesel. La cifra del universo del grupo que se investigó y los criterios de diseño son los presentados a continuación:

$$n = \frac{N * p * q}{\left(\frac{E}{z}\right)^2 (N - 1) + p * q} \quad \text{Ecuación No.3}$$

Donde:

n = tamaño de la muestra

N = tamaño del universo

p = probabilidad de ocurrencia de un evento

q = probabilidad de no ocurrencia de un evento

E= error de muestreo o error probabilístico de las estimaciones

z = nivel de confianza

Los criterios de diseño utilizados fueron los siguientes:

- $Z=95.5\%$
- $E=\pm 7\%$
- $p=50\%$
- $q=50\%$

Para encontrar el valor Z que le corresponde al 95.5% (valor utilizado para un error de 7%), se calculó:

$$0,955 / 2 = 0,477$$

Que al buscarlo en la tabla de Distribución de Probabilidad Normal Estándar, indicó un valor de 2.

Por lo tanto, sustituyendo los valores en la ecuación No. 3, se tiene el tamaño de muestra de 20 para vehículos gasolina y 11 para vehículos diesel.

3.4.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Al tener las muestras de aceite lubricante usado de los veinte vehículos gasolina y once vehículos diesel, se procedió a identificar cada una de ellas, y trasladarlas al laboratorio en donde se realizaron los análisis.

De los vehículos que se tomó la muestra, tanto de gasolina como diesel, se procedió a anotar el kilometraje actual al momento de realizar el servicio, el kilometraje previo al servicio, modelo del vehículo y fecha de toma de muestra.

Posteriormente, se realizó a cada una de las muestras la determinación del contenido de agua, caracterización de metales pesados y del poder calorífico, realizándolo de acuerdo con los procedimientos internos del laboratorio de la empresa en donde se llevaron a cabo los análisis.

3.4.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico es el análisis de datos cuantitativos o cualitativos que surgen del estudio de un grupo de muestras. Los datos se obtuvieron de dos talleres mecánicos que atienden vehículos gasolina y diesel, respectivamente; las muestras se tomaron de vehículos cuando fueron ingresados para un cambio de aceite lubricante.

El proceso de análisis estadístico que se utilizó fue el descriptivo, este método se enfoca en los métodos de recolección, descripción, visualización y resumen de datos, originados a partir de las variables de estudio.

El procedimiento utilizado para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos es el que se presenta a continuación:

Media aritmética

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} \quad \text{Ecuación No. 4}$$

En donde:

\bar{X} = media aritmética

$\sum X_i$ = sumatoria de conjunto de valores de la variable

N = número total de valores

Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Ecuación No. 5

En donde:

σ = desviación estándar

X_i = valores de las variables

\bar{X} = media aritmética

N = número total de valores

Tabla I. **Análisis estadístico para los valores de poder calorífico de aceites lubricantes de vehículos diesel y gasolina**

Poder calorífico máximo (GJ/t)	46,221
Poder calorífico mínimo (GJ/t)	43,881
Media de poder calorífico (GJ/t)	45,090
Desviación estándar (GJ/t)	585,97

Fuente: elaboración propia. Datos experimentales, valores de poder calorífico, Tabla IV.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de los análisis realizados a la muestra de aceite lubricante sin utilizar y a las muestras de aceites lubricantes usados, son los que se presentan a continuación; los mismos se discuten en la sección de interpretación de resultados.

- Determinación del contenido de agua por titulación de Karl Fischer, porcentaje peso/peso:

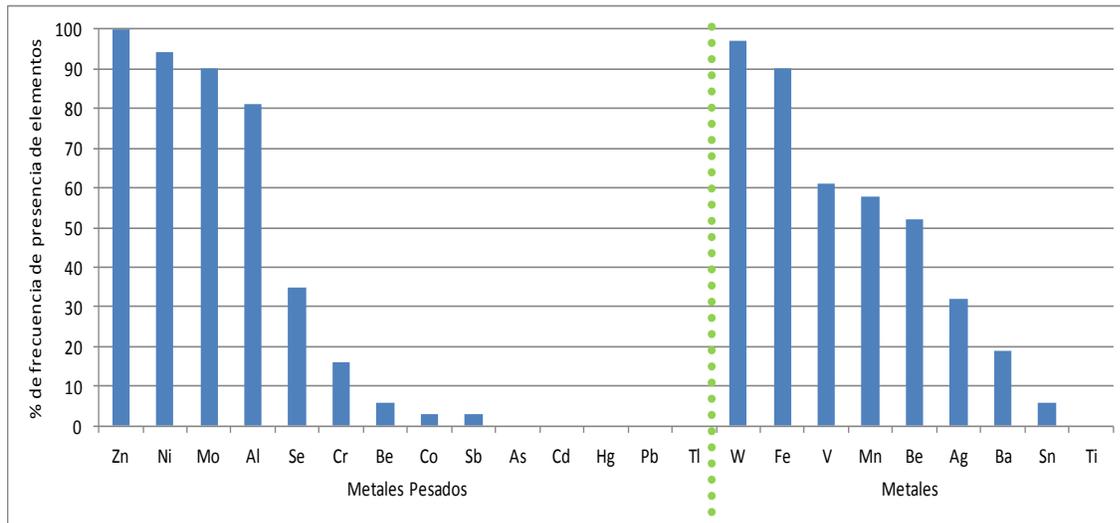
Tabla II. **Porcentaje de agua en aceites lubricantes**

Tipo de muestra	% de agua peso/peso, promedio
Aceite lubricante sin utilizar	0,00
Aceite lubricante usado	0,00

Fuente: elaboración propia. Análisis realizados por titulación de Karl Fischer.

- Caracterización de metales pesados en aceites lubricantes usados: los elementos que fueron caracterizados (presencia o ausencia) en los aceites lubricantes nuevos y usados de los dos tipos de vehículos tomados como universo de estudio (vehículos gasolina y diesel), por medio de espectroscopía de emisión atómica expresados en partes por millón, se muestran en la tabla siguiente, siendo los mismos: aluminio, hierro, plata, arsénico, boro, bario, berilio, cadmio, cobalto, cromo, mercurio, manganeso, molibdeno, níquel, plomo, selenio, antimonio, estaño, titanio, talio, vanadio, zinc y wolframio.

Figura 2. **Caracterización de metales en aceites lubricantes usados, utilizado en vehículos diesel y gasolina**

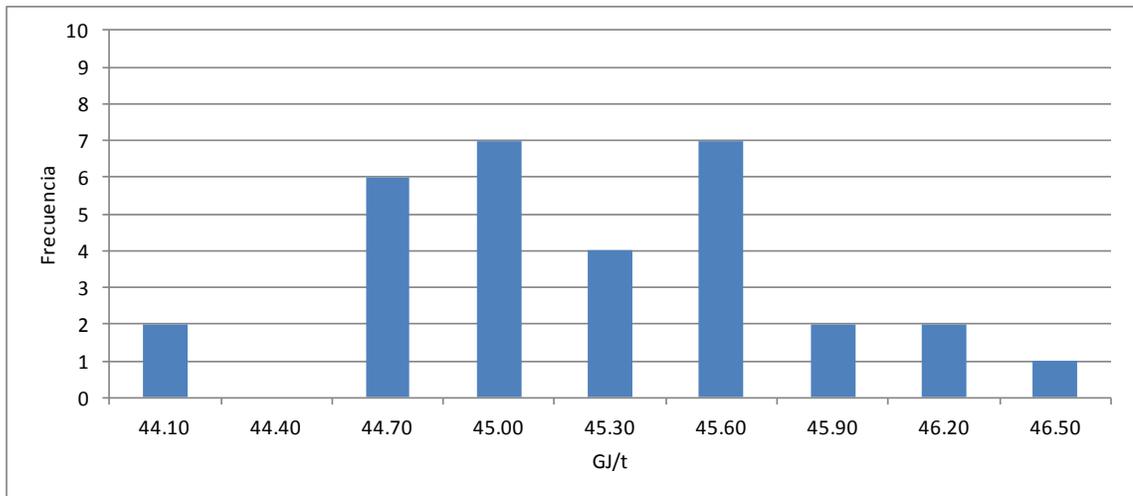


Fuente: elaboración propia.

Se realizó la determinación de metales en aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina (ppm). Los que no están presentes se encuentran por debajo del límite de detección del equipo utilizado.

- Poder calorífico de aceite lubricante usado.

Figura 3. **Determinación del poder calorífico en aceites lubricantes usados, utilizado en vehículos diesel y gasolina**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se dará paso a la interpretación de los resultados obtenidos de los análisis realizados a las muestras de aceite lubricante nuevo (para contar con una línea base) y aceite lubricante usado, que se extrajo de vehículos diesel y gasolina, al realizarles el servicio de mantenimiento que demanda el cambio de aceite lubricante de motor; aunque la distancia recomendada para dicho servicio es de 5 000 Km, los vehículos a los cuales se les tomó muestra tienen diversas distancias recorridas (mayores y menores a 5 000 Km).

Para llevar a cabo el presente trabajo de graduación, se visitaron dos talleres de servicio, uno orientado a atender vehículos livianos (diesel y gasolina) en el cual se tomaron veinte muestras de aceite lubricante usado de motor, y otro, orientado a atender vehículos pesados (diesel), en el cual se tomaron once muestras de aceite lubricante de motor.

Posterior a la toma de muestras, se procedió a trasladarlas al laboratorio para realizar las pruebas correspondientes, los resultados obtenidos para la determinación del contenido de agua y el poder calorífico se tabularon y se construyeron gráficas de dispersión (X, Y) en donde se comparó el kilometraje recorrido entre cambio de aceite lubricante de motor, versus las variables de investigación descritas anteriormente; mientras que para los metales pesados se tabuló la presencia de los veintitrés elementos que fueron objeto de análisis en las muestras de aceites lubricantes usados.

Las dimensionales con las cuales se trabajaron las diferentes muestras son:

- Contenido de agua: porcentaje en masa
- Metales pesados: partes por millón
- Poder calorífico: Gigajoule por tonelada

Dado que el objetivo de este trabajo es optimizar la utilización de los aceites lubricantes usados como método de eliminación minimizando los impactos al medio ambiente, se dio paso a analizar las muestras de aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina, en lo referente a las variables enumeradas anteriormente.

El contenido de agua se cuantificó por titulación utilizando el método Karl Fischer, con el cual se determinó que ninguna de las muestras contenía trazas de agua; el motivo principal de esta característica es que las muestras fueron tomadas inmediatamente a la apertura del tapón de purga de los reservorios de aceite de los vehículos analizados y embalada en recipientes especiales. Sumado a esto, la opinión de mecánicos profesionales indica que los automóviles analizados no presentan daños entre los sellos de las diferentes partes del vehículo por donde circula el agua.

El mismo procedimiento (determinación del contenido de agua por titulación utilizando el método Karl Fischer) se realizó a una muestra de aceite lubricante nuevo, determinándose que no contiene trazas de agua.

Es importante hacer mención sobre la forma de almacenaje de los aceites lubricantes usados en los talleres de servicio, ya que se almacenan (mezclan) con otros residuos líquidos que les son retirados a los vehículos a los cuales se les brinda servicio.

Debido a que el contenido de agua en todas las muestras fue de 0,00%, no se aplicó ningún análisis estadístico a los resultados obtenidos.

La caracterización de metales pesados en aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina se realizó por espectroscopía de emisión atómica, utilizando un analizador plasma acoplado inductivamente (ICP por sus siglas en inglés), para el cual se tienen soluciones estándares de calibración con un alto grado de pureza para analizar veintitrés elementos con un nivel de detección de 0,1 ppm.

Aunque los resultados obtenidos con el equipo ICP son cuantificables y se muestran en la sección de anexos, el objetivo del presente trabajo fue la caracterización (presencia o ausencia) de dichos elementos en aceites lubricantes usados, para lo cual se graficaron los resultados obtenidos en porcentaje de presencia de los elementos en las muestras de aceites lubricantes usados, considerándose como elementos ausentes los que se encuentran por debajo del límite de detección del equipo utilizado.

Es de mencionar que para algunos elementos sí fueron considerados los datos cuantificables, dado que internacionalmente se tienen parámetros de valores límites máximos permisibles en los aceites lubricantes usados, para poder ser utilizados en procesos de combustión industrial y/o para ser coprocesados, lo cual es de suma importancia para definir cómo serán eliminados.

Cabe destacar que en las muestras analizadas de aceites lubricantes usados, se encontró presencia del 43% del listado de metales, los cuales estaban presentes en el aceite lubricante nuevo; el 21% no se encontraba presente en el aceite lubricante nuevo y sí se encuentra en el aceite lubricante

usado; en ambos casos las concentraciones de los metales varían debido al uso del mismo en los vehículos, y el 36% de los metales no se encuentra en el aceite lubricante nuevo ni en el usado.

Como se indicó en el marco teórico, no existe una definición aceptada para metales pesados, por lo que se consideraron para caracterizarse en el presente trabajo de graduación los veintitrés elementos que tiene actualmente capacidad de analizar el equipo utilizado, considerándose como metales pesados los siguientes: Al, As, Be, Cd, Co, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Sb, Tl y Zn.

Esta clasificación se basó en los diferentes elementos que según la Enciclopedia de Tecnología Química realiza en cuanto a metales pesados; también en los elementos para los cuales se tienen valores límite de los diferentes permisos y reglamentos en Austria, Suiza y Alemania para los residuos utilizados para el coprocesamiento, que se describen en la Guía para el Coprocesamiento de Residuos en la Producción de Cemento; y finalmente, en los elementos que tienen límites máximos permisibles en aceites usados que han sido establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, (US EPA, por sus siglas en inglés).

Debido a que en Guatemala no existe regulación para los aceites lubricantes usados, se tomaron como referencia los límites máximos permisibles descritos en *Basel Convention Technical Guidelines on used oil re-refining or other re-uses of previously used oil*, establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, (US EPA, por sus siglas en inglés), los cuales se muestran en la tabla No. VIII; considerándose primordial hacer mención del resultado cuantificado para arsénico, cadmio, cromo y plomo por ser los elementos a los cuales se les tienen valores máximos

permisibles como especificaciones de aceites lubricantes usados para ser utilizados en procesos de combustión.

Para los resultados de los análisis de las muestras de vehículos diesel y gasolina, se puede observar ausencia de arsénico, cadmio y plomo, encontrando únicamente presencia de cromo (el cual está presente en el aceite lubricante sin uso) en cinco muestras de las treinta y un muestras analizadas, con un resultado máximo de 1,96 ppm, el cual se encuentra por debajo del límite máximo permisible que es de 10 ppm; por lo tanto es posible la utilización de aceites lubricantes usados en procesos de valorización energética, cumpliendo con normativas internacionales, para así minimizar los impactos al ambiente.

Tomando como referencia los valores límites de los diferentes permisos y reglamentos de Austria, Suiza y Alemania para los residuos utilizados para el coprocesamiento, descritos en la Guía para el coprocesamiento de residuos en la producción de cemento que se muestran en la tabla No. IX, se logró determinar que los valores obtenidos en ppm de los elementos cuantificados en las muestras de aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina, se encuentran por debajo de los valores límites máximos permisibles descritos, exceptuándose el níquel y zinc ya que se determinaron valores que superan los límites máximos permisibles; por lo que para poder eliminar los aceites lubricantes usados por coprocesamiento, deberán primero los mismos ser preprocesados. Es de hacer mención que el Cu no fue analizado.

Para analizar la variable de poder calorífico se utilizaron las mismas muestras de los vehículos diesel y gasolina, descritas al inicio de esta sección, bajo el procedimiento de calorimetría; los resultados se trazaron en una gráfica de dispersión (X, Y) donde se comparó el poder calorífico versus el kilometraje recorrido entre la fecha del último cambio de aceite de motor y el cambio actual.

De esta comparación se puede inferir que los poderes caloríficos altos se encuentran en aquellos vehículos con un recorrido entre 4 000 y 6 000 km, en donde el poder calorífico osciló entre un máximo de 46,138 GJ/t y un mínimo de 43,881 GJ/t (ver figura VII).

Un dato importante es la comparación entre el poder calorífico de la muestra de aceite lubricante nuevo cuyo valor fue de 45,698 GJ/t versus el valor promedio de las muestras de aceites lubricantes usados que fue de 45,090 GJ/t; lo que muestra una caída proporcional del poder calorífico de 3,98%.

Otro dato relevante es que, independientemente de su utilización en vehículos diesel o gasolina y de su recorrido, las muestras analizadas presentaron poderes caloríficos superiores a los 43,000 GJ/t; lo que vuelve a este residuo un elemento importante para ser tomado en cuenta en procesos de valorización energética (combustible alternativo), en procesos de combustión industrial y en procesos de combustión no controlados o tecnificados, en donde no se optimiza la eficiencia de la combustión de los combustibles utilizados; siendo el objetivo primordial la reducción de costos en la utilización del combustible, sin considerar los problemas ambientales que pueden causar, por la comparación que se realiza con el combustible principal (Bunker C y/o diesel) para los cuales el poder calorífico mínimo es de 42,000 GJ/t.

Otro de los objetivos planteados, fue determinar si el utilizar en procesos de combustión industrial en condiciones no adecuadas aceites lubricantes usados, contamina el medio ambiente, ya que los aceites usados por sus características de contenido energético son muy atractivos para utilizarse como combustible, sin embargo, debe tomarse en cuenta que también pueden contener ciertas características como agua y metales pesados que deben considerarse antes de su empleo, dependiendo del origen del material y si fue mezclado con otros residuos líquidos previamente, debido al almacenamiento en los talleres de servicio según se indicó.

Ante la ausencia de normativa en Guatemala, se revisó la normativa relacionada al tema en otros países, para poder respaldar que el utilizar aceites lubricantes usados en procesos de combustión industrial en condiciones no adecuadas contamina el medio ambiente, encontrándose por ejemplo, la normativa de El Salvador para el manejo del aceite usado, la cual indica que el aceite usado puede ser utilizado para recuperación de energía, solamente en aquellos dispositivos que alcancen temperaturas superiores a 1 000°C y un tiempo de exposición de llama de 0,5 segundos, entre otros.

De acuerdo con la Guía técnica del convenio de basilea para aceites usados, un gran volumen de los mismos son utilizados como combustibles alternativos, únicamente por su contenido de energía en procesos de combustión de condiciones controladas.

Sin embargo, por el alto poder calorífico que tienen los aceites usados es que procesos de combustión en condiciones no controladas los utilizan como combustible principal, sin ningún tratamiento previo y procesamiento, y sin ningún tipo de control de calidad y/o especificaciones del mismo.

Estos usos directos no constituyen una buena práctica, a menos que se demuestre según lo indican las directrices, que la combustión de los residuos se lleva a cabo de una manera ambientalmente racional y controlada. Al afirmar que el proceso es controlado, se debe a que todas las variables de combustión (descritas en el marco teórico) son monitoreadas, así también los gases de combustión deben ser monitoreados mediante analizadores de gases, los cuales deben estar tanto en la recámara del reactor, como en la chimenea de gases de salida del mismo; las variables que debieran ser monitoreadas son: CO_2 , CO , SO_x , NO_x , O_2 . De esta manera se garantiza una combustión eficiente y ambientalmente segura.

También indican las directrices que la utilización de los aceites usados como combustibles es posible porque los contaminantes no presentan problemas en la combustión.

Se hace referencia también a que la mayoría de los procesos de combustión en condiciones no controladas pueden utilizar aceites usados; sin embargo, esto puede provocar contaminación de todos los medios ambientales. Asimismo, las instalaciones de los procesos de combustión pueden sufrir corrosión cuando utilizan aceites usados con contenido de halógenos.

CONCLUSIONES

1. Debido a la ausencia de agua, los aceites lubricantes usados pueden utilizarse como combustible alternativo en procesos de combustión controlados.
2. Los aceites lubricantes usados de vehículos automotores diesel y gasolina pueden ser coprocesados, toda vez el contenido de metales pesados se encuentre por debajo de los límites máximos establecidos.
3. Debido a la similitud del poder calorífico de los aceites lubricantes usados referente al combustible principal, los mismos pueden utilizarse como combustible alternativo en procesos de combustión controlados.
4. La utilización de aceites lubricantes usados como combustible alternativo en procesos de combustión puede generar impactos ambientales, si no se asegura que sean utilizados en procesos de combustión controlados.

RECOMENDACIONES

1. El aceite lubricante usado luego de ser retirado de un vehículo automotor, debe ser almacenado en un recipiente en donde no se mezcle con otros residuos diferentes a los de los hidrocarburos, para que conserve sus propiedades y pueda ser utilizado en procesos de valorización energética como combustible alternativo.
2. Debe realizarse una determinación del contenido de agua, metales pesados y poder calorífico a los aceites lubricantes usados previo a su utilización, independientemente si los mismos fueron mezclados con otras fuentes de residuos en su almacenaje y/o transporte, dado que dependiendo de los resultados de los parámetros establecidos, se determinará si los mismos deberán ser o no, tratados previamente para poder ser utilizados en un proceso de valorización energética.
3. Proponer a las autoridades competentes en Guatemala, el crear, aprobar y aplicar un marco regulatorio que promueva el uso eficiente y responsable con el medio ambiente de los aceites lubricantes usados, tomando como referencia la Guía para el coprocesamiento de residuos.
4. La industria guatemalteca debe hacer los esfuerzos que estén a su alcance ante la ausencia de un marco regulatorio, para trabajar de manera responsable la sustitución de combustibles convencionales por combustibles alternativos, en este caso, aceite lubricante usado.

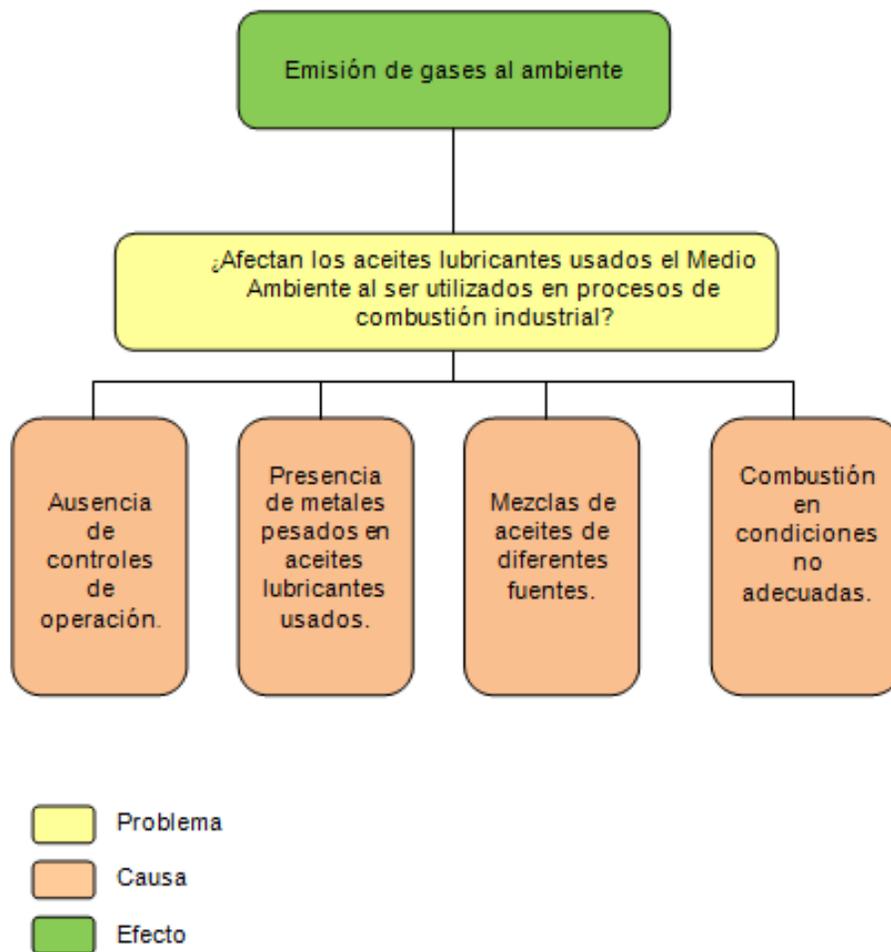
BIBLIOGRAFÍA

1. Centro Guatemalteco de Producción Más Limpia: Programa Ambiental Regional para Centroamérica. *Reporte Nacional de Manejo de Residuos en Guatemala. Residuo: Aceites usados de motor e hidroneumáticos*. Guatemala: 2004. 22 p.
2. CONAMA/GTZ. *Guía técnica para generadores de aceites industriales usados*. Chile: CONAMA, 2007. 80 p.
3. DEVORE, Jay L. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 6ª ed. México: Thomson, 2005. 744 p.
4. GTZ, et al. *Co-procesamiento, una oportunidad*. Chile: GTZ, 2007. 64 p.
5. GTZ; Holcim. *Guía para el Co-procesamiento de residuos en la producción de cemento*. Alemania: Cooperación Público-Privada, 2006. 46 p.
6. KIRK, Raymond; Othmer, Donald F. *Enciclopedia de Tecnología Química*. México: Unión Tipográfica, Hispano-americana, 1963. Tomo XIII. 1060 p.

7. MARTINEZ, Javier, et al. *Guía para la gestión integral de residuos peligrosos*. [en línea]. Fichas Temáticas. Tomo II. Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe. [ref. de 30 de abril 2011]. Disponible en Web: <http://web.idrc.ca/uploads/user-S/11437595971gr-02_04-aceites_pag35-42.pdf>.
8. PERRY, Robert H., et al. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª ed. España: McGraw-Hill, 2001. Vol. IV. 30-46 p.
9. PORTILLO NÁJERA, Aldo Alexander. *Caracterización de las propiedades físico-químicas de los aceites usados como combustible alternativo*. Trabajo de graduación de Ing. Químico, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2001. 85 p.

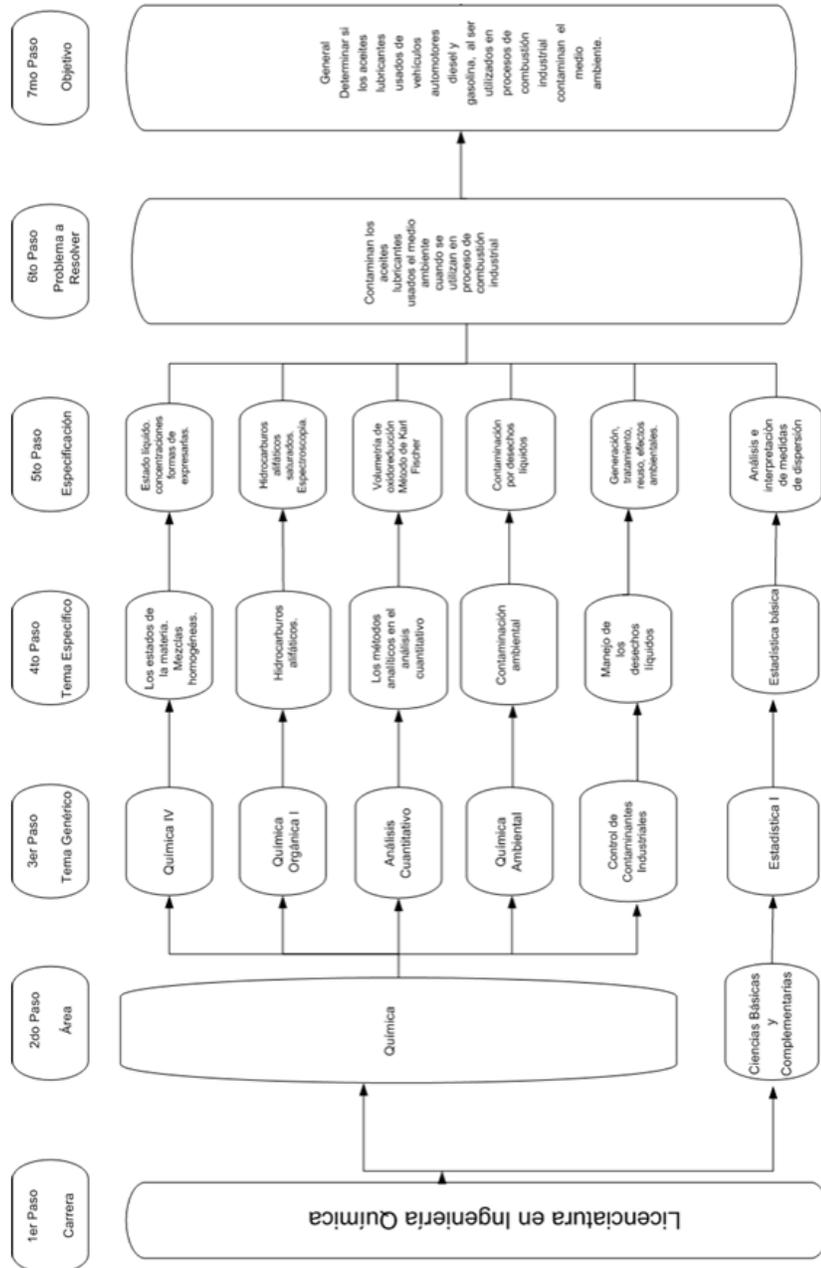
APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Tabla III. Ficha técnica para control de toma de muestras, datos originales

Ficha técnica para control de toma de muestras						
No. Muestra	Tipo de vehículo	Fecha de toma de muestra	Modelo del vehículo	Kilometraje		Km recorridos entre servicios
				Actual	Anterior	
1	Gasolina	6 de julio de 2011	2 009	52 252	46 922	53 330
2	Gasolina	5 de julio de 2011	2 010	25 460	19 971	5 489
3	Gasolina	5 de julio de 2011	2 008	80 832	72 896	7 936
4	Gasolina	5 de julio de 2011	2 003	167 519	162 496	5 023
5	Gasolina	5 de julio de 2011	2 002	162 158	157 175	4 983
6	Gasolina	5 de julio de 2011	2 011	10 203	5 124	5 079
7	Gasolina	5 de julio de 2011	2 003	139 479	124 424	15 055
8	Gasolina	5 de julio de 2011	2 010	5 431	3 619	1 812
9	Gasolina	5 de julio de 2011	2 010	69 048	61 902	7 146
10	Gasolina	5 de julio de 2011	2 008	41 022	36 377	4 645
11	Gasolina	5 de julio de 2011	2 007	94 970	90 019	4 951
12	Gasolina	5 de julio de 2011	2 006	111 820	106 107	5 713
13	Gasolina	5 de julio de 2011	2 008	38 379	33 379	5 000
14	Gasolina	5 de julio de 2011	2 000	197 775	193 651	4 124
15	Gasolina	6 de julio de 2011	1 999	110 258	105 966	4 292
16	Gasolina	5 de julio de 2011	2 004	139 126	105 233	33 893
17	Gasolina	6 de julio de 2011	2 007	119 834	114 154	5 680
18	Gasolina	6 de julio de 2011	2 007	46 427	36 133	10 294
19	Gasolina	5 de julio de 2011	2 007	46 562	31 804	14 758
20	Gasolina	5 de julio de 2011	2 010	27 784	21 930	5 854
21	Diesel	2 de agosto de 2011	2 006	92 057	86 533	5 524
22	Diesel	29 de julio de 2011	2 009	53 915	48 173	5 742
23	Diesel	31 de julio de 2011	2 008	75 740	69 983	5 757
24	Diesel	31 de julio de 2011	2 008	87 000	81 833	5 167
25	Diesel	29 de julio de 2011	2 009	81 076	75 715	5 361
26	Diesel	31 de julio de 2011	2 010	15 509	10 368	5 141
27	Diesel	29 de julio de 2011	2 008	98 929	93 921	5 008
28	Diesel	31 de julio de 2011	2 006	397 742	391 765	5 977
29	Diesel	31 de julio de 2011	2 007	195 831	190 415	5 416
30	Diesel	29 de julio de 2011	2 005	424 136	419 605	4 531
31	Diesel	29 de julio de 2011	2 008	240 717	235 057	5 660

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Determinación de metales en aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina (ppm)**

No. De muestra	Partes por millón de metales en aceites lubricantes usados																						
	Al	Fe	Ag	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	Sb	Sn	Ti	Tl	V	Zn	W
1	4.25	2.71	DLD	DLD	10.30	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	126.00	139.00	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	3.60	944.00	6.18
2	12.30	14.90	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1.73	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	2.93	1,420.00	12.60
3	6.91	12.50	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	98.70	199.00	103.00	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1.13	944.00	5.99
4	17.00	20.60	DLD	DLD	73.80	1.26	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	149.00	1,169.00	22.30	DLD	3.91	DLD	DLD	DLD	DLD	3.14	831.00	5.48
5	14.40	DLD	DLD	DLD	45.70	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	2.39	142.00	96.50	DLD	1.13	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	923.00	4.03
6	9.57	1.98	DLD	DLD	91.20	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	16.50	112.00	168.00	DLD	0.73	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	911.00	4.74
7	2.26	7.20	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	21.40	16.00	314.00	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1.44	1,280.00	5.87
8	7.14	DLD	DLD	DLD	29.60	1.26	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	121.00	339.00	257.00	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	0.13	936.00	2.52
9	0.95	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	228.00	DLD	2.76	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1,310.00	7.49
10	14.20	6.13	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	44.60	DLD	273.00	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	845.00	0.47
11	1.04	8.14	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	88.60	177.00	114.00	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	3.00	915.00	DLD
12	5.67	34.40	DLD	DLD	4.13	1.52	DLD	DLD	DLD	0.31	DLD	114.00	118.00	95.40	DLD	6.32	DLD	DLD	DLD	DLD	3.86	912.00	6.22
13	DLD	6.62	0.16	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1.57	14.20	119.00	DLD	5.44	DLD	DLD	DLD	DLD	3.85	1,030.00	6.95
14	1.38	19.40	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	0.62	DLD	DLD	2.57	131.00	DLD	4.29	0.13	DLD	DLD	DLD	4.77	1,460.00	12.60
15	DLD	5.01	0.15	DLD	6.84	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	5.19	116.00	132.00	DLD	5.44	DLD	0.15	DLD	DLD	3.07	1,120.00	7.18
16	11.90	18.70	0.44	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	19.10	9.47	108.00	DLD	2.69	DLD	DLD	DLD	DLD	1.78	799.00	6.25
17	1.57	8.63	DLD	DLD	9.28	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	263.00	111.00	116.00	DLD	1.55	DLD	DLD	DLD	DLD	4.27	808.00	3.73
18	1.50	10.30	0.48	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	17.30	18.00	119.00	DLD	2.50	DLD	DLD	DLD	DLD	2.60	1,070.00	7.04
19	34.60	42.30	DLD	DLD	1.53	0.47	0.19	DLD	0.18	1.96	DLD	489.00	102.00	70.00	DLD	DLD	DLD	0.75	DLD	DLD	8.37	1,100.00	10.90
20	6.28	11.50	DLD	DLD	78.20	0.58	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	18.70	80.30	105.00	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	4.13	801.00	6.94
21	3.28	49.60	0.18	DLD	255.00	0.26	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	12.50	49.90	110.00	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	3.76	1,700.00	18.80
22	14.60	131.00	DLD	DLD	33.50	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	14.10	71.40	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	2.04	988.00	5.35
23	33.80	36.20	DLD	DLD	282.00	DLD	DLD	DLD	DLD	0.69	DLD	DLD	54.80	26.30	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	8.21	1,840.00	22.90
24	2.30	11.80	1.15	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1.65	69.00	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1,200.00	11.40
25	4.13	33.90	0.12	DLD	61.50	DLD	DLD	DLD	DLD	0.83	DLD	DLD	16.80	16.50	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1,420.00	14.10
26	4.17	43.30	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	87.40	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1,180.00	11.10
27	DLD	52.30	DLD	DLD	31.70	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	10.90	98.60	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1,200.00	10.70
28	1.27	43.50	0.13	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	5.60	96.60	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1,270.00	11.70
29	DLD	40.90	0.14	DLD	55.20	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	14.30	87.00	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1,290.00	12.80
30	DLD	70.40	0.33	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	3.08	85.10	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1,740.00	19.20
31	DLD	9.18	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	8.85	106.00	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	DLD	1,660.00	16.90

Fuente: elaboración propia. Datos experimentales por espectroscopía de emisión atómica. Límite de detección 0,1 ppm.

Tabla V. **Poder calorífico de aceite lubricante nuevo y usado de vehículos diesel y gasolina**

Número de muestra	Poder calorífico
Aceite nuevo	45,698
1	44,514
2	46,138
3	44,009
4	45,345
5	44,844
6	45,358
7	44,506
8	45,493
9	44,991
10	45,510
11	44,628
12	43,881
13	44,727
14	45,103
15	44,750
16	44,489
17	44,877
18	44,571
19	45,221
20	45,031
21	44,530
22	45,758
23	44,832
24	45,336
25	45,561
26	46,198
27	44,920
28	45,435
29	45,717
30	46,221
31	45,288

Fuente: Datos experimentales por calorimetría.

Tabla VI. **Datos originales de contenido de de agua, poder calorífico y metales en aceite lubricante sin uso**

Datos originales aceite lubricante sin uso	
Contenido de agua:	0,00%
Metal	ppm
Al	50,30
Fe	7,78
Ag	17,00
As	DLD
B	398,00
Ba	DLD
Be	2,46
Cd	DLD
Co	DLD
Cr	DLD
Hg	DLD
Mn	DLD
Mo	60,40
Ni	98,10
Pb	DLD
Se	8,50
Sb	DLD
Sn	DLD
Ti	DLD
Tl	DLD
V	2,95
Zn	1740,00
W	20,60
Poder calorífico:	45,698

Fuente: elaboración propia. Datos experimentales por titulación de Karl Fischer, espectroscopía de emisión atómica y calorimetría.

Tabla VII. **Análisis estadístico de metales pesados en aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina**

Elemento	Máxima	Mínima	Media	Desviación
Al	34,60	0,95	8,66	9,16
Fe	131,00	1,98	26,90	27,37
Ag	1,15	0,12	0,32	0,31
As	DLD	DLD	DLD	DLD
B	282,00	1,53	66,84	83,71
Ba	1,52	0,26	0,89	0,52
Be	0,19	0,01	0,10	0,12
Cd	DLD	DLD	DLD	DLD
Co	0,18	0,18	0,18	
Cr	1,96	0,31	0,88	0,63
Hg	DLD	DLD	DLD	DLD
Mn	489,00	1,57	89,36	121,70
Mo	1 169,00	1,65	108,79	222,52
Ni	314,00	16,50	118,11	69,94
Pb	DLD	DLD	DLD	DLD
Se	6,32	0,73	3,34	1,88
Sb	0,13	0,13	0,13	
Sn	0,75	0,15	0,45	0,42
Ti	DLD	DLD	DLD	DLD
Tl	DLD	DLD	DLD	DLD
V	8,37	0,13	3,48	2,07
Zn	1 840,00	799,00	1 156,00	298,23
W	22,90	0,47	9,27	5,30

Fuente: elaboración propia. Análisis estadístico de datos tabla IV.

Tabla VIII. **Especificaciones de aceite usado**

Contenido	Límite permisible
Arsénico	5 ppm máximo
Cadmio	2 ppm máximo
Cromo	10 ppm máximo
Plomo	100 ppm máximo
Total halógenos	400 ppm máximo
<i>Flash point</i>	37,77 °C mínimo

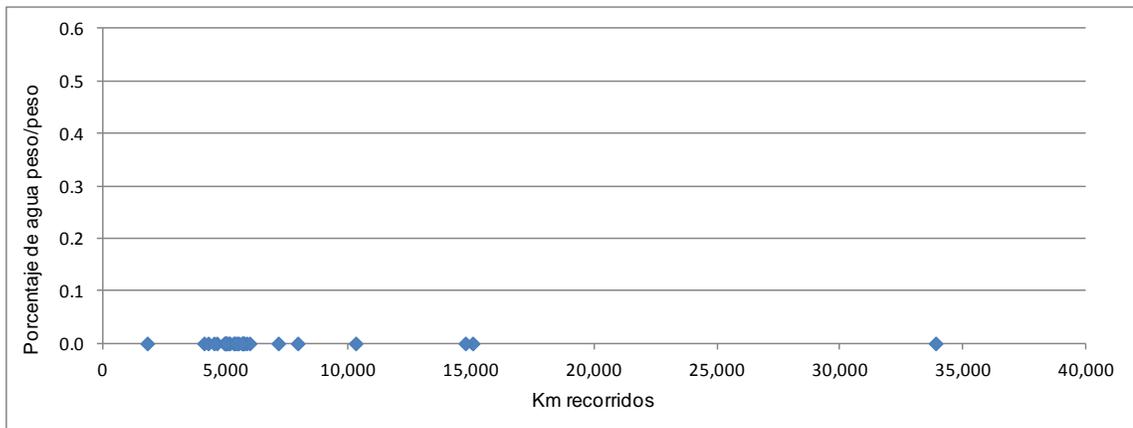
Fuente: Directrices técnicas del Convenio de Basilea sobre el uso de aceite usado, 2002. p.15

Tabla IX. **Valores límites máximos permisibles para aceites lubricantes usados para el coprocesamiento**

Elemento	Austria	Suiza	Alemania
	Valores máximos (ppm)		
As	20	15	15
Sb	100	5	20
Be		5	2
Pb	800	200	150
Cd	20	2	4
Cr	300	100	50
Cu	500	100	180
Co	25	20	25
Ni		100	30
Hg	2	0,5	1
Tl	5	3	2
V		100	10
Zn		400	
Sn	100	10	30

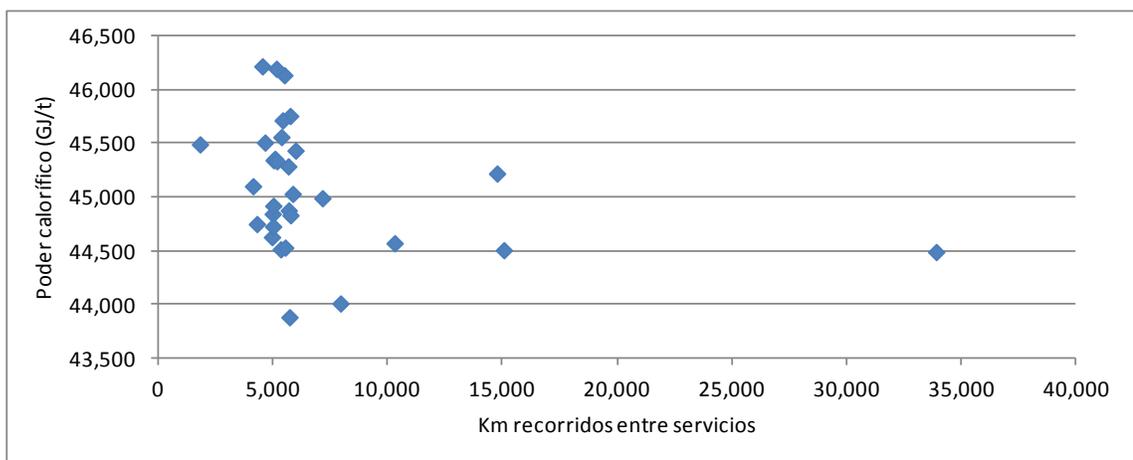
Fuente: Guía para el Coprocesamiento de Residuos en la Producción de Cemento. p. A-19

Figura 4. **Contenido del porcentaje de agua de aceites lubricantes usados versus los kilómetros recorridos entre servicios de vehículos diesel y gasolina**



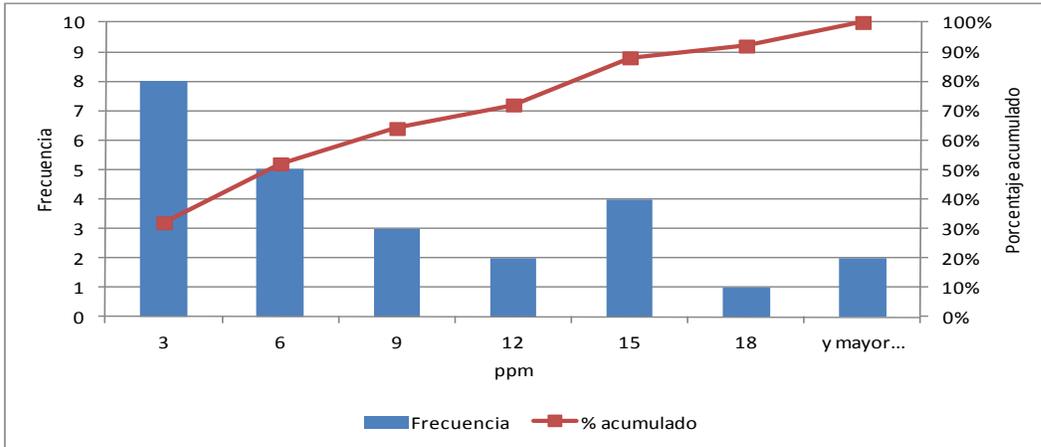
Fuente: elaboración propia

Figura 5. **Poder calorífico de aceites lubricantes usados versus los kilómetros recorridos entre servicios de vehículos diesel y gasolina**



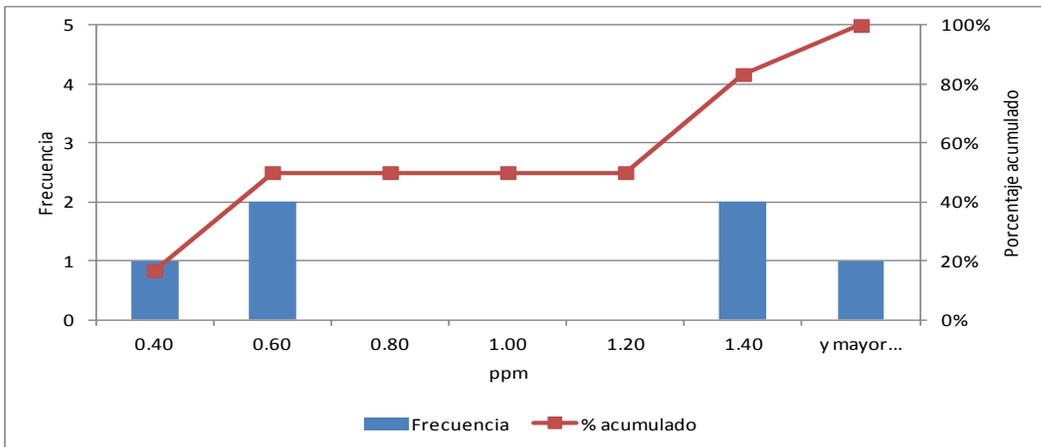
Fuente: elaboración propia

Figura 6. Frecuencia del aluminio en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



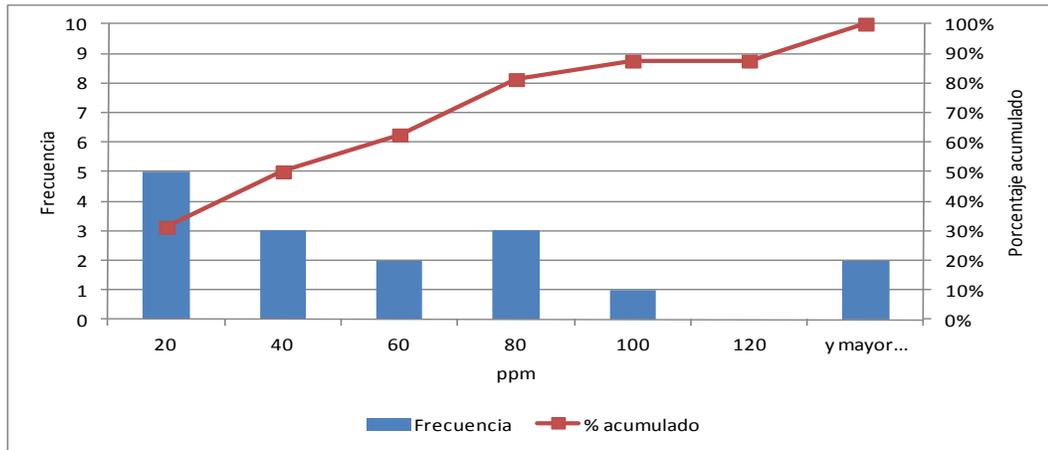
Fuente: elaboración propia

Figura 7. Frecuencia del bario en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



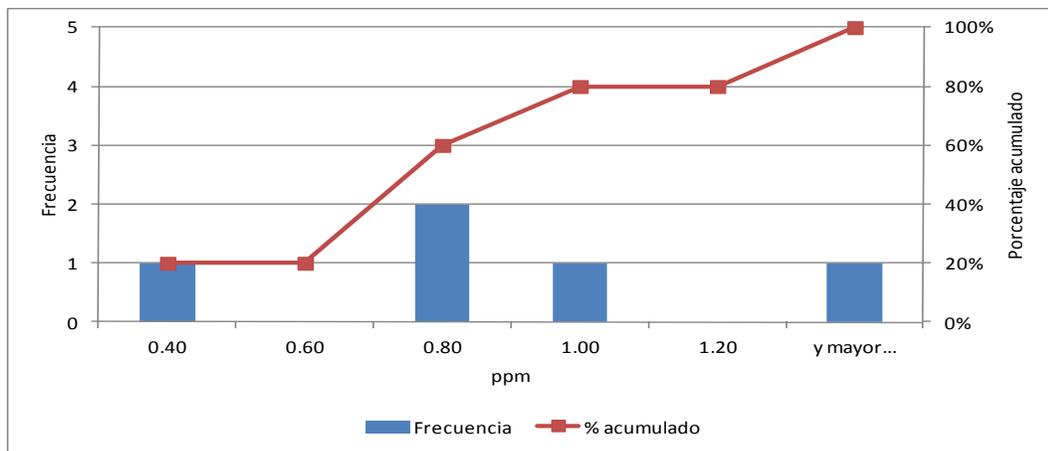
Fuente: elaboración propia

Figura 8. Frecuencia del boro en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



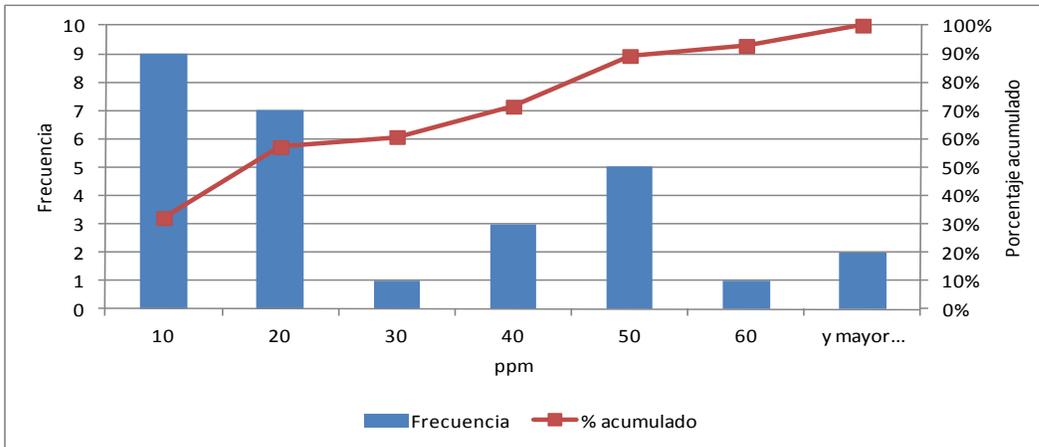
Fuente: elaboración propia

Figura 9. Frecuencia del cromo en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



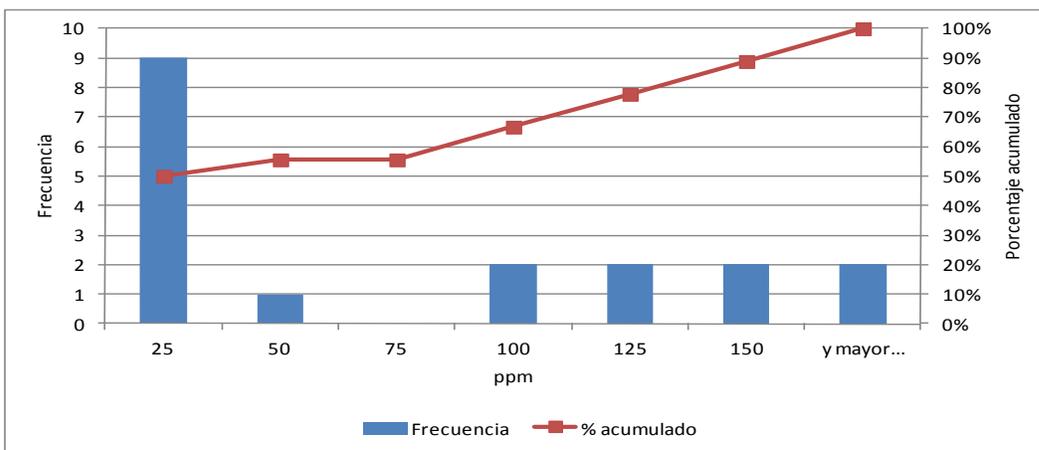
Fuente: elaboración propia

Figura 10. Frecuencia del hierro en ppm de los aceites lubricantes diesel y gasolina



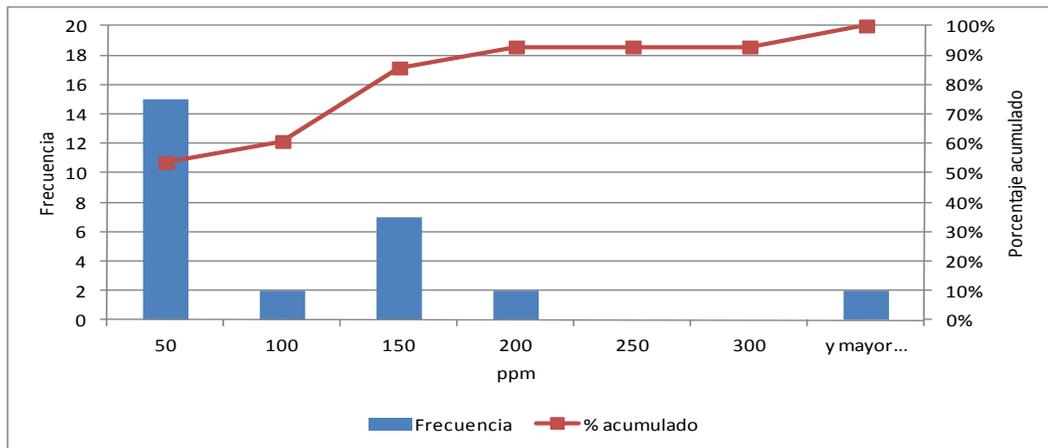
Fuente: elaboración propia

Figura 11. Frecuencia del manganeso en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



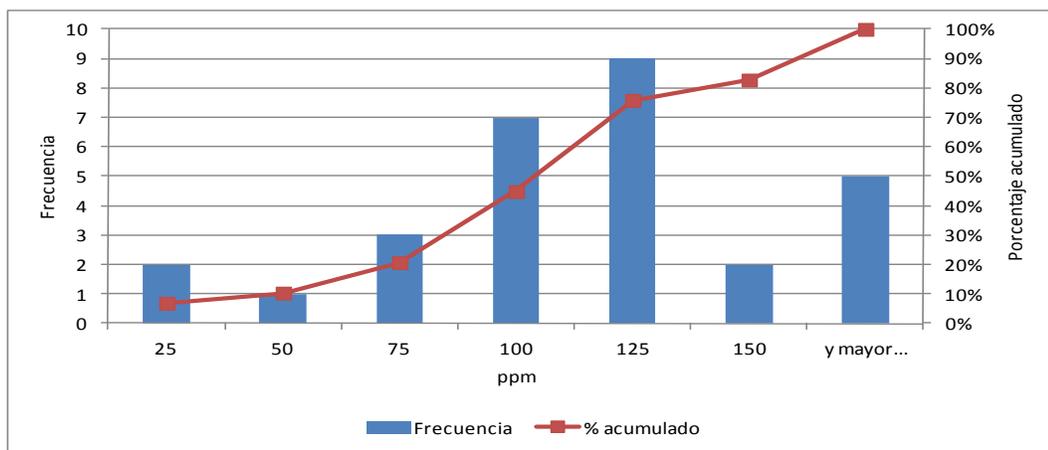
Fuente: elaboración propia

Figura 12. Frecuencia del molibdeno en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



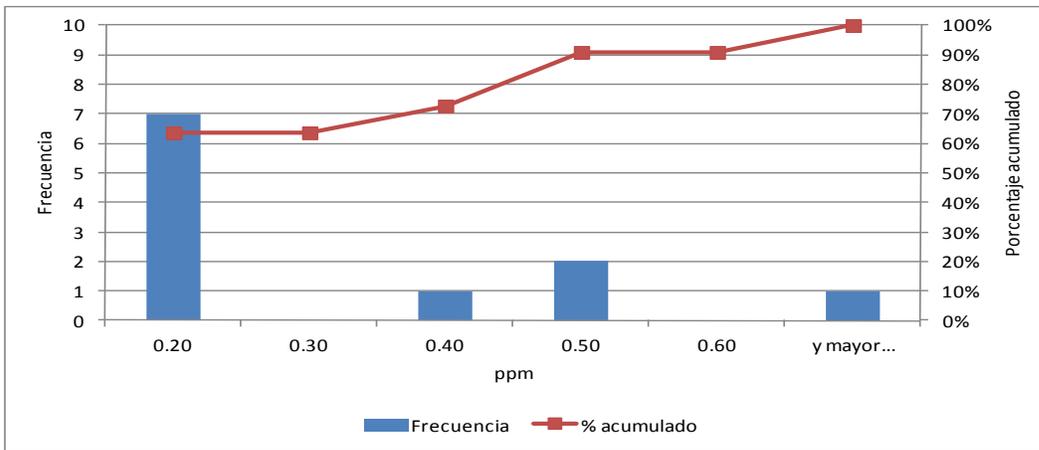
Fuente: elaboración propia

Figura 13. Frecuencia del níquel en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



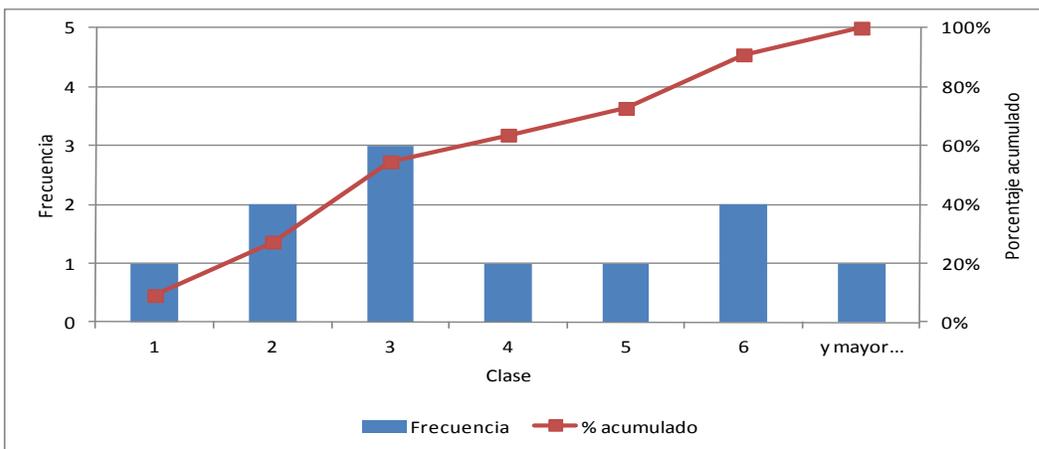
Fuente: elaboración propia

Figura 14. Frecuencia de plata en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



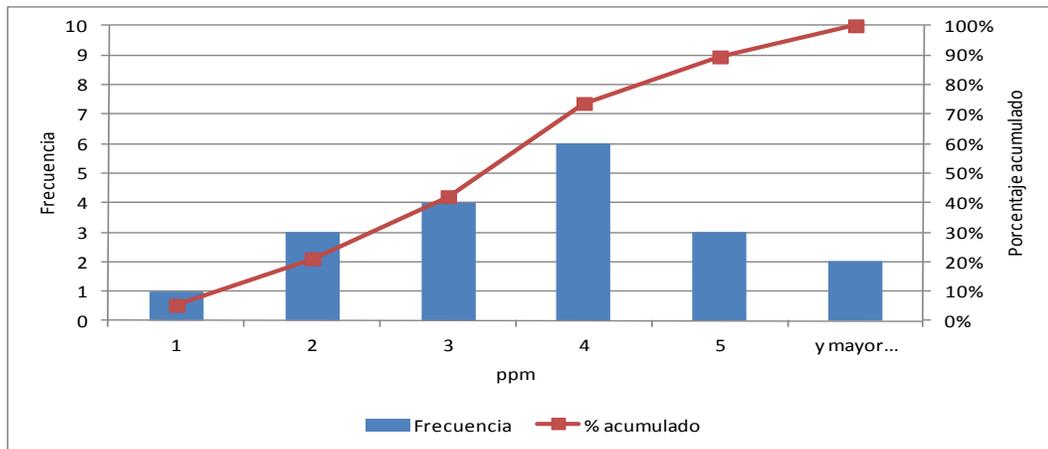
Fuente: elaboración propia

Figura 15. Frecuencia de selenio en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



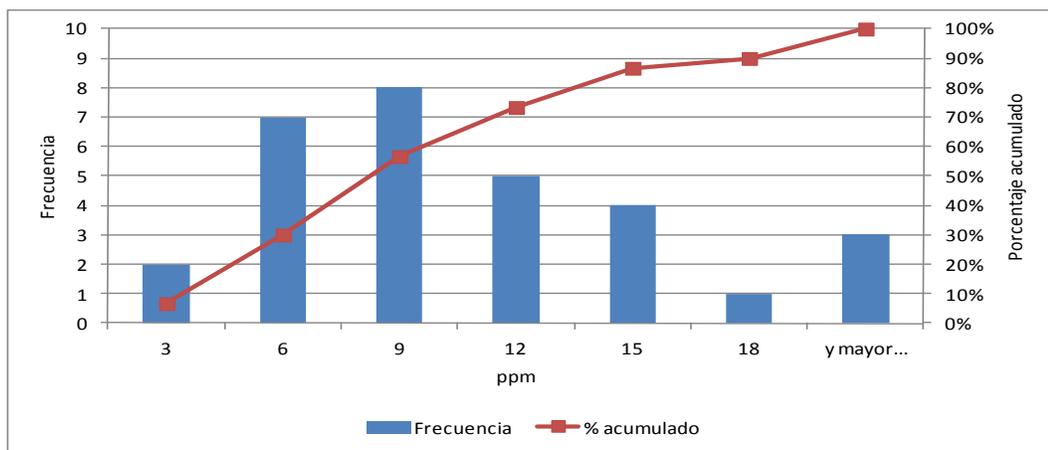
Fuente: elaboración propia

Figura 16. Frecuencia del vanadio en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



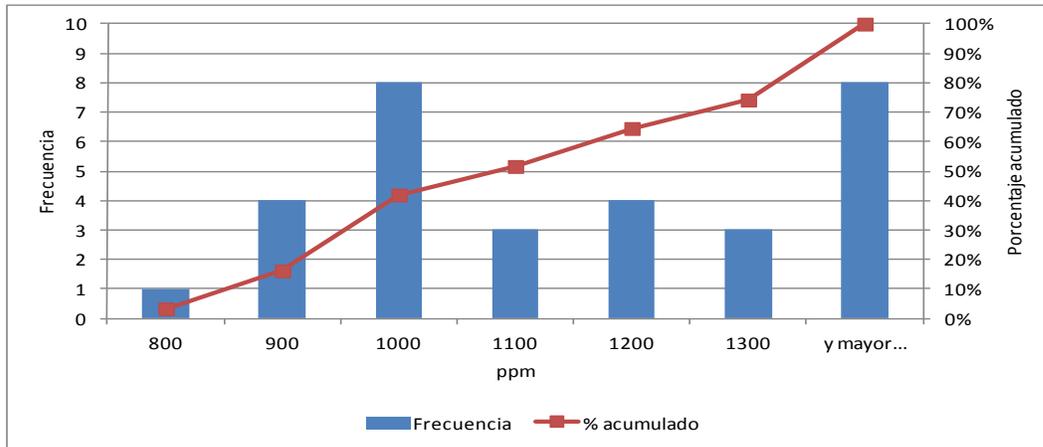
Fuente: elaboración propia

Figura 17. Frecuencia del wolframio en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



Fuente: elaboración propia

Figura 18. Frecuencia de zinc en ppm de los aceites lubricantes usados de vehículos diesel y gasolina



Fuente: elaboración propia

Fotografías de los equipos utilizados para los análisis realizados

Figura 19. Karl Fischer



Fuente: laboratorio de Recursos Alternativos.

Figura 20. **Plasma acoplado inductivamente**



Fuente: laboratorio de Recursos Alternativos.

Figura 21. **Horno microondas**



Fuente: laboratorio de Recursos Alternativos.

Figura 22. **Bomba calorimétrica**



Fuente: laboratorio de Recursos Alternativos.

ANEXOS

1. Procedimiento interno de laboratorio para la determinación del contenido de agua por titulación de Karl Fischer.

Equipo utilizado:

- Equipo Karl Fischer
- Piseta de agua destilada
- Jeringas
- Papel mantequilla

Equipo de seguridad:

- Guantes
- Lentes de seguridad

Descripción:

- Seleccionar en el equipo, el método "Titulación KF";
- Colocar en el vaso de muestra 50 mL de combimethanol, cubriendo los electrodos;
- Seguir los pasos indicados para el equipo;
- Tarar la balanza colocándole una jeringa seca, pesar la cantidad necesaria de muestra líquida y anotar el dato (dato 1);
- Iniciar la titulación. Introducir el peso de la muestra de dato 1, seleccionar la unidad de gramos, al mismo tiempo, introducir la muestra en el vaso;
- Tomar el peso de la jeringa vacía (dato 2);

- Al llevar a cabo la titulación, configurar el equipo en “live” (en vivo) para que pueda seguirse tanto la curva de titulación como los actuales valores medidos;
- Continuar con los pasos indicados específicos para el equipo;
- Al finalizar la determinación, se requiere el peso de la jeringa vacía (dato 2) y se acondiciona el equipo;
- Pulsar “Stop” cuando el equipo haya terminado el acondicionamiento;
- En la pantalla aparecerá una vista del reporte, revisar el dato del contenido de agua en unidades de porcentaje (%);
- Vaciar el vaso de muestra, siguiendo la instrucción de aspiración de solución. Para limpiar el vaso, retirarlo de la base y lavarlo con agua destilada. El agua de lavado, desecharla en el recipiente designado.

2. Procedimiento para la determinación de metales pesados por ICP

Equipo utilizado:

- Plasma acoplado inductivamente (ó ICP por sus siglas en inglés)
- Horno microondas
- Campana de extracción
- Tubos de ensayo

Equipo de seguridad:

- Guantes de nitrilo
- Lentes de seguridad
- Mascarilla

Reactivos:

- Ácido nítrico
- Argón líquido
- Gas nitrógeno
- Agua desmineralizada
- Estándar de manganeso, antimonio, arsénico, berilio, cadmio, cobalto, cobre, cromo, estaño, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio, telurio, vanadio y zinc.

Descripción:

- Colocar las mangueras de la bomba peristáltica en el carrito;
- Colocar la manguera de la bomba de lavado en su carrito;
- Verificar que el recipiente de lavado que contiene ácido nítrico al 5% esté lleno;

- Encender la bomba de lavado; esperar a que el flujo inicie y rebalse el recipiente con el capilar, revisar que no haya obstrucciones en la manguera;
- Trasladar el capilar a un vial con agua desmineralizada y encender la bomba del nebulizador; dejar correr el agua por 5 minutos a través de la manguera, asegurar que no existan fugas ni obstrucciones;
- Después de 5 minutos apagar la bomba del nebulizador;
- Regresar el capilar a la posición 0;
- Apagar la bomba de lavado;
- Encender el plasma;
- Calibrar con manganeso;
- Cargar el método que se va a utilizar para el análisis de metales pesados;
- Revisar el método y verificar la posición en el automuestreador, tanto del blanco (HNO₃ 5%) como de los estándares patrón de 1, 10 y 100 ppm;
- Crear el archivo que contendrá los resultados obtenidos;
- Iniciar con la calibración de estándares;
- Revisar que la correlación de la calibración sea igual o cercana a 1;
- Si la correlación y concentración de los estándares cumplen, proceder a analizar las muestras y comparar contra la curva de calibración;
- Imprimir los resultados;
- Apagar el equipo.

3. Procedimiento para la determinación del poder calorífico

Equipo utilizado:

- Bomba calorimétrica IKA
- Balanza analítica
- Vidrio reloj
- Horno
- Hilo de algodón

Descripción:

- Pesar la cantidad de material en la balanza analítica;
- Pesar el aceite lubricante usado en la cápsula de combustión;
- Colocar el material en la capsula de combustión;
- Adicionar 1 ml de agua destilada a la bomba calorimétrica, utilizando una pipeta volumétrica de 1.0 ml. Realizarlo en la parte interna de la bomba;
- Colocar la cápsula de combustión en el receptor interno de la bomba;
- Colocar 1 hilo de algodón amarrado en el alambre de acero inoxidable, asegurando que toque la muestra a analizar;
- Cerrar la bomba calorimétrica;
- Operar la bomba calorimétrica para que realice el análisis;
- Tomar nota de los resultados de poder calorífico en las unidades que se requiera (MJ, cal, BTU, etc.).