



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**  
SECRETARÍA GENERAL  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR  
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
Fecha: 11/03/2022

C. Jorge Luis Meneses Montes

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería Ambiental

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:  
Aceites lubricantes gastados como combustible alternativo en la industria calera

En la modalidad de: Tesis

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

**Revisores**

Mtro. Pedro Vera Toledo

Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar

Dr. Luis Alberto Ballinas Hernández

**Firmas:**

[Firma]  
[Firma]

Ccp. Expediente



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES  
DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA EDUCATIVO DE  
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS**

**“Aceites lubricantes gastados como  
combustible alternativo en la industria calera”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO AMBIENTAL**

**Presenta:**

**Jorge Luis Meneses Montes**

**Director:**

**Dr. Luis Alberto Ballinas Hernández**

**Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

**Marzo de 2022**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Escuela de Ingeniería Ambiental por todos estos años de aprendizaje en los que crecí y emprendí una aventura en tan noble carrera, así como a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas por abrirme las puertas para desempeñar mi crecimiento académico y que con orgullo llevaré por siempre como mi alma máter.

Al Dr. Luis Alberto Ballinas Hernández, director de tesis, amigo y excelente profesor que me ayudó a fortalecer mis conocimientos y compartió sus experiencias, sabiduría y consejo para inculcar en mí un sentido ético y profesional en esta carrera.

Al Dr. Raúl González Herrera y Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar por ser excelentes profesores de vasto conocimiento, que me brindaron orientación y apoyo en la realización de este trabajo.

A todo el personal académico, pero especialmente a los profesores Pedro Vera Toledo; profesor y amigo que estuvo presente en gran parte de esta trayectoria académica, por compartir sus experiencias personales y mostrarnos que la vida se puede ver de manera sarcástica; y a la Dr. Rebeca Isabel Martínez Salinas por ser nuestra tutora en toda esta experiencia, por brindarnos su apoyo y esfuerzo en nuestro desarrollo académico y enseñarme lo valioso que es ser autodidacto.

## **DEDICATORIA**

Les dedico esta tesis a las siguientes personas por ser una parte indispensable para mi vida, desarrollo personal y profesional.

A mi familia, Yolanda, Guillermo y mi hermano Raúl, por su apoyo, paciencia, confianza y amor incondicional que me motivó a ser mejor estudiante y mejor ser humano, por su esfuerzo para que nunca me faltara nada y por ser mi motor para siempre superarme.

A todos mis primos y tíos que en estos años que pasé lejos de mi hogar fueron los primeros en brindarme apoyo, amistad y toda su disposición para que nada me faltara.

A mis compañeros y colegas, principalmente con los que forjé una verdadera amistad, que me inspiran y me motivan para seguir adelante en mi vida personal, académica y profesional.

## Resumen

De acuerdo a cifras oficiales reportadas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en México se generan constantes toneladas de residuos de aceite lubricante gastado (ALG), en el estado de Chiapas, esta cifra ha alcanzado hasta las 1270 ton de generación en la última década. El ALG es catalogado como un residuo peligroso (RP) según lo establecido por las Normas Oficiales Mexicanas y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, por lo que su exposición al ambiente conlleva una serie de impactos negativos que afectan el equilibrio ecológico y la salud humana. Por consiguiente, el objetivo de esta investigación es evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de incorporar el ALG como combustible alternativo en una industria calera. La primera parte de la metodología consistió en dimensionar las cantidades generadas de ALG en el año 2019 en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, a través de una consulta con la SEMARNAT y una empresa autorizada para recolectar y transportar RP. Posteriormente, se realizó un recorrido por una empresa que fabrica calhidra, donde se pudo conocer el combustible convencional utilizado y así poder comparar su factibilidad contra el ALG, tomando en cuenta la demanda energética que la industria calera requiere para sus procesos. Se compararon los costos de seguir utilizando el combustible convencional y los costos para incorporar ALG tomando en cuenta la inversión para infraestructura y autorizaciones. Por último, se evaluó su factibilidad ambiental, aunque con los resultados se puede concluir la viabilidad de este proyecto, se requiere un estudio de las emisiones que genere quemar ALG a 1200°C, esto con el fin de determinar el tipo de pretratamiento a emplear y si las partículas que persistan después del proceso se emanan a la atmósfera o quedan en la cal viva debido a sus propiedades para absorber metales pesados. Sin embargo, actualmente en Chiapas no existe ninguna industria calera que quemar ALG.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	8
II. ANTECEDENTES	10
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
IV. JUSTIFICACIÓN	14
V. OBJETIVOS	16
V.1 Objetivo general	16
V.2 Objetivos específicos	16
VI. HIPÓTESIS	17
VII. MARCO TEÓRICO	18
VII.1 Lubricante	18
VII.1.1 Composición de los lubricantes	18
VII.2 Aceite lubricante de motor	19
VII.2.1 Base de un aceite lubricante de motor	20
VII.2.2 Aditivos	21
VII.2.3 Clasificación de los aceites lubricantes por su naturaleza	22
VII.2.4 Propiedades físicas del aceite lubricante	23
VII.2.5 Propiedades térmicas del aceite lubricante	24
VII.2.6 Propiedades químicas del aceite lubricante	25
VII.3 Aceite lubricante gastado	26
VII.3.1 Contaminantes presentes en aceites lubricantes usados	28
VII. 4 Impactos del ALG a la salud y al ambiente	29
VII.5 Fundamento legal	31
VII.6 Aceite lubricante gastado como residuo peligroso	33
VII.6.1 Metales pesados	33
VII.7 Alternativas de reúso y disposición	34
VII.8 Co-procesamiento de residuos peligrosos	35
VII.9 Industria calera	37

VII.9.1 Roca caliza	37
VII.9.2 Composición de la caliza	37
VII.9.3 Hidróxido de calcio	37
VII.9.3.1 Tipos de cal	37
VII.9.4 Procesos	38
VII.10 Coque de petróleo	41
VIII. MARCO METODOLÓGICO	44
IX. RESULTADOS	51
IX.1 Disponibilidad de aceite lubricante gastado	51
IX.1.1 Disponibilidad de recolección y transporte	54
IX.2 Eficiencia técnica	55
IX.3 Factibilidad económica ambiental	58
IX.3.1 Costos de transporte y recolección	59
IX.3.2 Costos de la autorización para quemar ALG	61
IX.4 Eficiencia ambiental	64
IX.5 Posibles alternativas para el pretratamiento del ALG	67
IX.5.1 Centrifugación	67
IX.5.2 Proceso ácido-arcilla	69
IX.5.3 Extracción por solvente	72
IX.5.4 Proceso de Berk (Sedimentación-filtración)	73
IX.6 Autorización para el aprovechamiento energético de residuos peligrosos	74
X. CONCLUSIONES	79
XI. RECOMENDACIONES	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición del aceite lubricante.....	19
Tabla 2. Contaminantes presentes en el ALG.....	29
Tabla 3. Propiedades del coque.....	42
Tabla 4. Cantidad de ALG generado en Tuxtla Gutiérrez en 2019 .....	51
Tabla 5. Generación por periodo y tipo de residuo.....	52
Tabla 6. Cantidad de aceite gastado en el periodo 2004-2019 .....	52
Tabla 7. Clases de generadores y cantidad generada de RP en Chiapas en el periodo 2004-2019 .....	53
Tabla 8. Relación del combustible y materia prima necesarias para crear CaO.....	55
Tabla 9. Poder calorífico de algunos combustibles .....	56
Tabla 10. Estimación del precio para transportar 1000 L de RP.....	60
Tabla 11. Piezas de la centrifugadora .....	68
Tabla 12. Trámite para la autorización de co-procesamiento.....	77



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso para la obtención de cal Fuente: Subsecretaría de minería, 2014; tomado de Kelly Errol G, 1990.....	39
Figura 2. Gráfica comparativa de propiedades caloríficas.....	57
Figura 3. Inversión económica destinada al combustible convencional en USD .....	58
Figura 4. Relación de costos de ALG y CP .....	59
Figura 5. Dimensión de 1 almacén temporal para RP.....	62
Figura 6. Horno vertical en la industria calera Fuente: Schwarzkopf, 1970.....	65
Figura 7. Diseño de centrífuga para ALG Fuente: Delgado et al, 2011.....	68
Figura 8. Esquema del proceso ácido-arcilla. Fuente: Delgado et al, 2007.....	70

## I. INTRODUCCIÓN

Desde el 2019 en el estado de Chiapas, se han llegado a generar hasta 1270 ton anuales de aceite lubricante gastado (ALG). Es un residuo peligroso (RP) que conlleva una serie de impactos negativos para el ambiente por su mala disposición y a la salud después de un cierto período de tiempo (Ramesh, Narayana, 2016).

El ALG es una mezcla de sustancias químicas, compuesto por una mezcla compleja de alifáticos, hidrocarburos aromáticos, metales pesados, sulfatos, productos de nitración, compuestos carboxílicos y aditivos de lubricación, que fueron contaminados por humedad y en el desgaste de su uso (Shabanzade, Salem, Salem, 2019), y establecido como residuo peligroso por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).

Disponer de residuos como el ALG en los rellenos sanitarios o en los tiraderos a cielo abierto, representa una inadecuada solución para disponer estos residuos, debido a que el aceite se convierte en parte del lixiviado y termina en las aguas subterráneas. La contaminación del agua superficial o del suelo no solamente es perjudicial para nuestra especie, sino para todas las demás formas de vida. Incluso bajo incineraciones no controladas, puede emitir más plomo al aire que cualquier otra fuente industrial, según estudios desarrollados por la Environmental Protection Agency (Fong, Quiñonez, Tejada, 2017).

En el presente trabajo se hace referencia a la industria calera como aquella que trabaja en la fabricación de calhidra ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) o también denominada cal hidratada o cal apagada, mediante la calcinación de rocas calizas. Esta industria extrae rocas calizas para ser trituradas y calcinadas, dando como resultado la cal viva ( $\text{CaO}$ ), esta posteriormente se mezcla con agua para obtener la calhidra (Palma, 2009).

El aceite lubricante gastado representa una fuente potencial de combustible de alto valor y materia prima química. La opción de eliminación preferida en la mayoría de los países es la incineración y la combustión para la recuperación de energía (Nasim, Sohail, Babu, Lotia, 2014). La valorización energética del ALG utilizado como una fuente energética con métodos que no puedan dañar al medio ambiente, es una alternativa que al final mitigaría los posibles riesgos a la salud humana (Andrade *et al*, 2017; tomado de Lagarinhos & Tenório, 2008).

El desconocimiento del impacto que ocasionan las industrias potencialmente contaminadoras del medio ambiente, crea la necesidad de realizar una valoración del impacto (Capdevilla, Silva, Gotaro, 2016), y buscar alternativas para los residuos generados en el proceso productivo que, en gran medida, son peligrosos para la salud humana y los ecosistemas.

En esta investigación se propuso y evaluó la incorporación del ALG como combustible alternativo en la industria calera, a fin de disponer estos residuos peligrosos aprovechando su potencial energético, reduciendo el riesgo de que se generen impactos ambientales negativos producto de su mala disposición.

Con base en la investigación realizada, se puede afirmar que incorporar este residuo como combustible alternativo en una industria calera es un medio de disposición ambiental, económica y técnicamente viable.

Aunque el resultado es positivo, se requiere un estudio de las emisiones de un horno vertical que queme ALG, para confirmar si las partículas persistentes como los metales pesados se emanan a la atmósfera (razón por la que el residuo necesita un pretratamiento) o se quedan en la cal viva debido a sus propiedades de absorber metales pesados. Sin embargo, actualmente en Chiapas no existe ninguna industria calera que queme ALG.

## II. ANTECEDENTES

El aceite usado contamina tanto las aguas subterráneas como superficiales, afecta la permeabilidad de la tierra y contamina el aire cuando es quemado ya que las emisiones, además de CO<sub>2</sub>, contienen metales pesados y sustancias tóxicas. Por tal razón la recuperación de los aceites usados, como fuente de energía, constituye un paliativo al medio ambiente, buscando alternativas de procesamiento de residuos peligrosos (Delgado, Parra, Aguilar, Guevara, Novoa, 2007).

Por su elevada capacidad calorífica, el aceite usado se constituye en uno de los residuos con mayor potencial para ser empleado como combustible en la industria en instalaciones que debidamente ensayadas y homologadas muestren su aptitud para destruir y retener los compuestos (Kopytynski, 2011).

Por la necesidad de contar con alternativas energéticas y suministro seguro de energéticos, algunos países como Australia, Estados Unidos y México, cuentan con normas que permiten la utilización de los aceites usados tratados como combustible (Kopytynski, 2011).

De igual forma, la valorización energética del aceite usado al mezclarse con fuel-oil para combustión directa en hornos de cemento o en calderas industriales pequeñas, se presenta como alternativa de aprovechamiento. Para el uso en hornos con menor potencia térmica, se emplean procesos químicos de separación de elementos volátiles y de metales pesados (Fong, Quiñonez, Tejada, 2017).

En Europa, especialmente en Francia, existe una amplia experiencia en el empleo de aceites usados en fábricas de cemento. Se estima totalmente aceptable una sustitución parcial del combustible convencional por aceites gastados (Martín, 2008).

Los aceites lubricantes gastados adquieren concentraciones elevadas de metales pesados como plomo, cadmio, cromo, arsénico y zinc. El origen de estos metales se atribuye principalmente por el desgaste del motor o maquinaria que lubricó. (Martínez, 2005).

El método empleado para tratamiento de la muestra varía según se determinen elementos volátiles y no volátiles. Para la determinación de elementos no volátiles, el método implica la combustión de la muestra en un crisol con el uso de un mechero. Para la determinación de elementos volátiles, el método consiste en una digestión ácida (Amesty *et al*, 2015).

La destrucción de aceites usados en incineradores de RP se da cuando éstos presentan niveles de contaminantes de metales pesados o halógenos que no permiten ser usados como combustibles (Peñañiel, 2017).

Las etapas de uso y disposición final son las principales productoras de gases de combustión y se determinó que la alternativa de disposición más utilizada en algunos países es la recuperación energética al utilizarlo como combustible (González, 2014).

Con las síntesis conceptuales antes descritas, el uso de ALG como combustible en la industria es una alternativa óptima siempre que se verifique la necesidad de aplicar un tratamiento previo que remueva ciertos contaminantes que persistan después de la calcinación.

### **III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El panorama mundial para la demanda de aceite lubricante era de aproximadamente 40 millones de toneladas métricas por año y alrededor del 60% de su producción se convirtió en residuo (Arpa, Yumrutas, Demirbas, 2010), esto quiere decir que alrededor de 24 millones de toneladas métricas de ALG fueron generados cada año, convirtiéndolo en uno de residuos peligrosos más abundantes y contaminantes que se han producido en la actualidad.

Según los datos que fueron reportados desde el 2019 en el inventario de generación de residuos peligrosos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2019), la generación de residuos de aceites lubricantes en el panorama nacional llegó a ser de hasta 294.822,36 ton desde el 2004 al 2019. Mientras que en el estado de Chiapas, se llegaron a generar aproximadamente 1270 ton en la última década.

Los aceites residuales de motores son residuos altamente contaminantes que requieren una gestión responsable; estos pueden causar daños al medio ambiente cuando se vierten en el suelo o en las corrientes de agua incluyendo alcantarillas. Esto puede resultar en la contaminación de las aguas subterráneas y del suelo. (Fong, Quiñonez, Tejada, 2017).

El aceite lubricante usado contiene diversos compuestos químicos tales como metales pesados, (por ejemplo, cromo, cadmio, arsénico, plomo, entre otros), hidrocarburos aromáticos polinucleares, benceno y algunas veces solventes clorados, PCBs, entre otros. Estos compuestos químicos producen un efecto directo sobre la salud humana y varios de estos productos son cancerígenos (Fong, Quiñonez, Tejada, 2017).

La problemática de muchos países en vías de desarrollo es la mala gestión de sus RP, lo que ocasionan impactos ambientales negativos (Andrade *et al*, 2017). Siendo la falta de aplicación de normas el principal promovente de estos impactos negativos (Dalla, Khlebinskaia, Lodolo, Miertus, 2003).

Se sabe que para quemar un RP para su aprovechamiento energético, se requiere autorización por parte de la SEMARNAT, sin embargo, no es posible quemar este residuo si no existen las condiciones necesarias para su incineración (LGPGIR, 2003).

Como referencia de un sistema que asemeja al de la industria calera se puede tomar en cuenta el proceso de la industria cementera, ya que utiliza hornos que queman a altas temperaturas y son capaces de destruir los elementos que hacen peligroso al residuo, además, el producto generado, sea el cemento, cal o arcilla, tienen las propiedades para absorber los metales pesados que persistan (Baráibar 2016), aunado a esto, para quemar ALG se deben proporcionar todas las adecuaciones necesarias y valorar la introducción del combustible a un pretratamiento que remueva los componentes peligrosos que persistan (Fong, Quiñonez, Tejada, 2017), para posteriormente ser quemado a temperaturas mayores a 1100° C (López, 2016).

## IV. JUSTIFICACIÓN

Quemar el ALG como combustible alternativo bajo las respectivas medidas de seguridad ambiental es una alternativa para disponer de este residuo sin que se presenten riesgos de liberarse al ambiente y provocar daños ambientales y a la salud, facilitando su adecuada disposición.

La mala disposición del ALG provoca que millones de toneladas de estos RP se eliminen a través de la recuperación no energética y derrames en las aguas o en los suelos, que también pueden ocasionar un impacto a las corrientes subterráneas, haciendo que estas no sean aptas para el consumo humano (Fong, Quiñonez, Tejada, 2017). Disponer el residuo para su aprovechamiento energético como combustible podría evitar estos perjuicios ambientales por lo que su conversión en combustibles es muy importante en términos de protección del medio ambiente (Ramesh, Narayana, 2016).

Una manera segura para disponer el ALG sería disponiéndolo como combustible alternativo en los procesos productivos de una industria. En la industria calera se necesita quemar un combustible económicamente viable y con las características físico-químicas necesarias para calcinar la materia prima (Subsecretaría de Minería, 2014), para esto la industria compra un combustible como el coque de petróleo o también denominado pet coke, cuyo precio en el mercado en el 2019 llegó a fluctuar en los \$172 USD/ton, el equivalente aproximado de \$3400 MXN. Lo que significa que en términos económicos podría ser sustituido por ALG, ya que adquirir este residuo a través de los servicios de recolección y transporte de una empresa autorizada por la SEMARNAT llegó a tener un precio de hasta \$2000 MXN/ton.

Si el ALG se incorpora como combustible alternativo, podría ser una opción viable por su elevada capacidad calorífica, tiene gran potencial para ser empleado como combustible,



no sólo por sus propiedades y características, sino por la necesidad de contar con alternativas energéticas que no generen grandes impactos al ambiente (Delgado *et al*, 2007). Las altas temperaturas de los hornos de la industria calera destruyen los componentes que lo hacen un residuo peligroso, ya que estos hornos trabajan a temperaturas de 1200° C, lo suficiente para eliminar los componentes que caracterizan a este residuo como peligroso, además que la cal tiene propiedades para absorber metales pesados, por lo que es probable que estos no se emanen a la atmósfera.

## **V. OBJETIVOS**

### **V.1 Objetivo general**

Evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental del uso del aceite lubricante gastado como combustible alternativo en una industria calera.

### **V.2 Objetivos específicos**

- Dimensionar la generación y disponibilidad del ALG en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez para conocer si puede abastecer la demanda de combustible que requiere la industria calera.
- Valorar la factibilidad de sustituir el combustible convencional por ALG en los procesos técnicos de la industria calera.
- Valorar la factibilidad económica de quemar ALG como combustible alternativo en una calera.
- Valorar la factibilidad ambiental de sustituir el combustible convencional e identificar las posibles alternativas para el pretratamiento del ALG.

## **VI. HIPÓTESIS**

El ALG es un residuo peligroso que puede ser factible de ser aprovechado como combustible alternativo desde un punto de vista técnico, económico y ambiental, para sustituir los combustibles convencionales en los hornos de la industria calera.

## **VII. MARCO TEÓRICO**

### **VII.1 Lubricante**

Los lubricantes son sustancias que evitan el contacto directo entre superficies que se encuentran en movimiento, reduciendo la fricción y a su vez disminuye las consecuencias que la misma trae consigo: calor excesivo, desgaste, ruido, vibración, golpes (Beltrán, 2012).

#### **VII.1.1 Composición de los lubricantes**

Los lubricantes están compuestos por un aceite base y aditivos modificadores que mejoran las propiedades. Los aceites base que provienen del refinado del petróleo son aceites minerales, en cambio los aceites realizados por reacciones petroquímicas se les conoce como aceites sintéticos (GULF OIL ARGENTINA S.A, 2016).

La base mineral está constituida por tres tipos de compuestos: parafínicos, nafténicos y aromáticos. Los parafínicos son el 60-70% de la base por tener mejores propiedades lubricantes, el resto de componentes contribuyen con propiedades que carecen las parafinas (GULF OIL ARGENTINA S.A, 2016).

Las bases sintéticas se diferencian de las minerales debido a que poseen mejores características como:

- Mejores propiedades lubricantes
- Mayor índice de viscosidad
- Mayor fluidez a baja temperatura
- Mayor estabilidad térmica y a la oxidación
- Menor volatilidad

**Tabla 1.** Composición del aceite lubricante

Composición media de un aceite lubricante virgen de base mineral	
Hidrocarburos totales (85-75%)	
Alcanos	45-76%
Cicloalcanos	13-45%
Aromáticos	10-30%
Antioxidantes	Di fosfatos, fenoles, aminas
Detergentes	Sulfatos, fosfatos, folatos
Antiespumantes	Siliconas, polímeros sintéticos
Antisépticos	Alcoholes, fenoles, compuestos clorados

Fuente: GULF OIL ARGENTINA S.A, 2016

El aceite base no posee todas las características para cumplir todas las funciones de un lubricante, para resolver esto se utiliza aditivos que variarán dependiendo de los siguientes aspectos (GULF OIL ARGENTINA S.A, 2016).

- La aplicación del lubricante
- Las condiciones de trabajo
- Niveles de prestaciones que se desea alcanzar

## **VII.2 Aceite lubricante de motor**

Son una mezcla de hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos obtenidos por destilación de crudos petrolíferos (aceites minerales) o por síntesis a partir de productos

petroquímicos (aceites sintéticos). La variación en la proporción de los diferentes tipos de hidrocarburos en la mezcla determina las características físicas y químicas de los aceites. Una alta fracción de hidrocarburos parafínicos confiere al aceite una mayor resistencia a la oxidación, mientras que un alto contenido de hidrocarburos aromáticos favorece la estabilidad térmica (Ruiz, 1991).

La palabra lubricante procede del latín "lubricus" que significa escurridizo, resbaladizo, etc. y se aplica a aquellas sustancias que, con independencia de su estado, sirven para disminuir e incluso evitar el rozamiento entre dos superficies, de las cuales, al menos una de ellas, está en movimiento (Crisóstomo, 2018).

Los aceites lubricantes están constituidos por una base que puede ser mineral o sintética, la misma que proporciona las características principales de lubricación, además se complementan con aditivos para mejorar sus propiedades (Beltrán, 2012).

### **VII.2.1 Base de un aceite lubricante de motor**

#### **Aceite mineral**

El aceite mineral proviene del petróleo, por lo general es nítido, sin color ni olor. Su obtención es a partir de la destilación del petróleo crudo. Está compuesto por hidrocarburos de cadena larga y existen diferentes tipos en cuanto a densidad y viscosidad (Total, 2016).

#### **Aceite sintético**

El aceite sintético es un lubricante que consiste en compuestos químicos artificialmente fabricados. Los lubricantes sintéticos pueden fabricarse utilizando componentes de petróleo modificados químicamente en lugar de crudo completo, pero también pueden ser sintetizados a partir de otras materias primas. El aceite sintético se utiliza como sustituto del lubricante refinado del petróleo cuando opera en temperaturas extremas,

ya que, en general, proporciona propiedades mecánicas y químicas superiores a las encontradas en los aceites minerales tradicionales (Total, 2016).

Según la ONCAE (2016), existe una variedad de lubricantes sintéticos.

- Hidrocrack: Es una base sintética de origen orgánica que se consigue de la hidrogenización de la base mineral.
- PAO: Es una base sintética de origen orgánica, que agrega un compuesto químico a nivel molecular llamado "Poli-Alfaolefinas" esto hace que aumente su resistencia a la temperatura y poca volatilidad.
- PIB: Es una base sintética creada para la eliminación de humo en el lubricante por mezcla en motores de 2 tiempos. Se denomina Poli-isobutileno.
- ESTER: Es una base sintética que no deriva del petróleo sino de la reacción de un ácido graso con un alcohol.

### **VII.2.2 Aditivos**

Los aceites lubricantes están constituidos por una base lubricante y una serie de aditivos. Según Palomo (2015) son los siguientes:

- **Antioxidantes**: En presencia de aire y a altas temperaturas el aceite se oxida por lo que es necesario un aditivo que evite la oxidación o retrase el envejecimiento prematuro del lubricante.
- **Antidesgaste Extrema Presión (EP)**: Se emplean en cajas de cambios y diferenciales, debido a que forman una fina película entre las piezas a lubricar.
- **Antiespumantes**: Impiden la formación de burbujas que se generan por la cavitación y así se evitan la entrada de aire al circuito de lubricación.

- Antiherrumbre: Evitan la condensación de vapor de agua y con ello la formación de óxido en las paredes metálicas a lubricar.
- Detergentes: Se encargan de arrancar la suciedad producidas por la combustión que se pegan a las partes internas del motor.
- Dispersantes: Son los encargados de mantener limpio el motor, ya que transportan la suciedad arrancada por los aditivos detergentes hasta el filtro o cárter del motor.
- Espesantes: Se encargan de aumentar la viscosidad del lubricante gracias a compuestos de polímeros que al aumentar la temperatura aumentan de tamaño.
- Diluyentes: Ayuda al lubricante a fluir a bajas temperaturas debido a que reduce los microcristales.

### **VII.2.3 Clasificación de los aceites lubricantes por su naturaleza**

- Aceites parafínicos: Son hidrocarburos que gracias a su cadena abierta y saturada tienen un elevado índice de viscosidad, temperaturas de ignición e inflamación altas lo que los hace ideal para motores de combustión interna, ya que no se espesan a temperaturas bajas, los cuales son ideales para motores que tienen que hacer arranques en frío (Andrade, 2015).
- Aceites nafténicos: Estos poseen una cadena cerrada, debido a esto su índice de viscosidad es bajo. La principal característica de estos aceites es que forman poco carbón evitando el atascamiento de elementos en fricción u obstrucciones en los ductos de lubricación del motor (Andrade, 2015).
- Aceites aromáticos: Son utilizados en cajas de velocidades, debido a su bajo índice de viscosidad, los hidrocarburos aromáticos se oxidan con facilidad formando ácidos orgánicos, por este motivo se les utiliza en la transmisión ya que permanecen en



contacto con la superficie a lubricar si presencias contaminantes que faciliten su oxidación. Son químicamente activos y se denominan con la "serie del benceno" (Andrade, 2015).

#### **VII.2.4 Propiedades físicas del aceite lubricante**

- **Color y fluorescencia**

En la actualidad esta característica carece de valor crítico ya que los aditivos enmascaran estas propiedades. Por otro lado, no existe ninguna relación entre el color y la calidad de un lubricante, sin embargo, hace años los usuarios daban un indicativo de un mejor o peor grado de refinación (Benlloch, 1990).

Los aceites usados al cambiar de color, indican degradación o contaminación del lubricante, esto se debe a que el motor en funcionamiento produce carbonillas que son arrastradas por el aceite, con presencia de partículas de hierro por la capacidad detergente que poseen los aceites que mantienen limpios al motor (Andrade, 2015).

- **Viscosidad**

Es una propiedad importante que depende de la presión y de la temperatura con la cual se define como la resistencia de fluido, determina la factibilidad que una maquina pueda arrancar a baja temperatura del ambiente, la viscosidad de cualquier fluido tolera cambios de temperatura, esta disminuye a medida que la temperatura aumenta. Por consiguiente, es necesario determinar las viscosidades de un aceite lubricante a temperaturas diferentes, las temperaturas establecidas son 40°C y 100°C (Benlloch, 1990).

- **Densidad**

Los aceites de origen aromático son los que poseen mayor densidad, los nafténicos se consideran de densidad media y los de origen parafínico tienen la menor densidad (Andrade, 2015).

- **Punto de fluidez**

Esta propiedad es más utilizada para ambientes con temperaturas extremadamente bajas, esto se debe a que el punto de fluidez de un lubricante es la capacidad de fluir sin ser perturbado. Las bajas temperaturas forman cristales en los aceites que se encadenan formando una estructura rígida, evitando la fluidez del aceite (Andrade, 2015). Existen varias escalas que se encargan de medir la viscosidad del aceite, pero en el caso de los lubricantes del motor se emplean los grados SAE (Society of Automotive Engineers), que relacionan la viscosidad del aceite con la temperatura de utilización de cada lubricante (Sierra, 2010).

### **VII.2.5 Propiedades térmicas del aceite lubricante**

- **Punto de inflamación y fuego**

Son las condiciones de temperatura y presión que permite que el aceite llegue a su punto de inflamabilidad, el aceite desprende suficientes vapores que se inflaman al mezclarse con el aire, causando una llama abierta. Es aplicada cuando una prueba de este tipo se realiza bajo ciertas condiciones específicas, la temperatura a la cual esto sucede se denomina punto de inflamación, los vapores a esta temperatura son suficientes para provocar una combustión sostenida y por ende la llama desaparece, a este punto se denomina punto de fuego (Andrade, 2015).

El punto de inflamación de los aceites nuevos varía de acuerdo a su viscosidad, de alta viscosidad tiene altos puntos de inflamación. Estos puntos están afectados por el tipo

de crudo. Aceites nafténicos tienen menores puntos de inflamación que aceites parafínicos de viscosidad similar. Un buen lubricante, además de tener un punto de inflamación alto para dificultar su combustión, debe ofrecer poca tendencia a la formación de residuos carbonosos (Benlloch, 1990).

- **Índice de viscosidad**

En los líquidos, al aumentar la temperatura disminuye su viscosidad. En los aceites, es fundamental que la viscosidad disminuya lo menos posible al elevarse la temperatura. Cuanto mayor sea el índice de viscosidad de un aceite lubricante para motor, se verá menos influido en su viscosidad por la elevación de cargas y temperaturas y por tanto un mejor comportamiento lubricante (Benlloch, 1990).

- **Punto de congelación**

Es la temperatura en la cual el aceite pierde toda capacidad de fluir. Es por tanto interesante que este punto sea lo más bajo posible atendiendo a las necesidades de utilización. Con frecuencia los aditivos mejoran notablemente este punto de congelación (Benlloch, 1990).

- **Punto de enturbiamiento**

Es la temperatura a las que las parafina y otras sustancias empiezan a separarse en forma de cristales aumentando notablemente el riesgo de obstrucciones en el circuito de lubricación (Benlloch, 1990).

## **VII.2.6 Propiedades químicas del aceite lubricante**

- **Formación de espumas**

Un aceite produce espuma superficial por agitación energética con el aire u otro gas, estando dicha espuma constituida por la agrupación de burbujas de distintos tamaños.

Si esto llega a producirse en un grado elevado, tendremos pérdidas de aceite, una lubricación ineficaz y un consumo elevado de aceite. Por tanto el grado de no formación de espumas es otra de las características del aceite (Benlloch, 1990).

- **Índice de alquitrán**

Es la cantidad de sustancias alquitranosas en valores porcentuales de un aceite, el índice de alquitranización es un proceso de envejecimiento artificial para establecer la predisposición del aceite a temperaturas y en contacto con el aire, con el aceite en uso se puede comprobar su envejecimiento (Benlloch, 1990).

- **Emulsionabilidad del aceite**

Es una propiedad más importante de un lubricante para cilindros y turbinas a vapor, es la tendencia a formar emulsiones o mezclas intensas y duraderas con el agua (Benlloch, 1990).

- **Untuosidad**

Es la capacidad del lubricante de llegar a formar una película de adherencia y espesor entre dos superficies deslizantes, quedando suprimidos entre ellas, para el análisis mediante esta propiedad se realiza por la tensión superficial (Benlloch, 1990).

### **VII.3 Aceite lubricante gastado**

El Convenio de cooperación científica (2006), considera que el aceite lubricante gastado es todo aquel aceite lubricante (de motor, de transmisión o hidráulico, con base mineral o sintética) residual, generado a partir del momento en que deja de cumplir la función inicial para la cual fue destinado. Los aceites lubricantes se contaminan, durante su utilización, con productos orgánicos de oxidación, con otros materiales como carbón,

con productos provenientes del desgaste de los metales y con otros sólidos. Cuando los aditivos se degradan, el aceite pierde sus propiedades, generándose los aceites lubricantes usados, los cuales deben ser almacenados, transportados, reciclados, reprocesados o eliminados evitando la contaminación del ambiente y la afectación a los seres vivos.

El ALG es una mezcla de sustancias químicas, su composición depende de la marca del aceite y de las características del motor en que fue usado. Hay varios contaminantes que pueden aparecer en el aceite gastado. Todos estos son dañinos y causan desgaste. Las partículas grandes causan el daño al entrar al motor, rayando o lijando las camisas o el bloque, después quedan atrapadas en el filtro de aceite. Las partículas menores continúan circulando, dañando cojinetes, bujes, válvulas con sus guías y asientos, anillos y camisas en cada paso por el motor (Amesty *et al*, 2015).

El ALG se genera después de utilizar aceites lubricantes para las industrias (Amesty *et al*, 2015; tomado de Arner, Barberán y Mur, 2006). También es usado en motores de combustión interna como agente lubricante y es manejado como un combustible auxiliar, re-refinado e incorporado en asfalto o eliminados en vertederos (Ifeanyichukwu, 2011).

El complejo de los residuos de aceites se ha convertido en un factor importante en la contaminación del medio ambiente desde la llegada del motor de combustión interna. Se sabe que muchos de los agentes de los aceites son tóxicos para los seres humanos, animales y plantas pues estos pueden llegar a ser cancerígenos disruptores endocrinos. (Ifeanyichukwu, 2011).

Los aceites usados están compuestos por hidrocarburos totales de petróleo (HTP) bifenilos policlorados (PCB), aromáticos policíclicos (HAP), metales y otros compuestos que deterioran el medio ambiente y a la salud humana por sus efectos cancerígenos tóxicos y venenosos, se consideran sustancias de difícil degradación (Vázquez et al 2010)

### **VII.3.1 Contaminantes presentes en aceites lubricantes usados**

El aceite lubricante usado contiene diversos compuestos químicos tales como metales pesados, (por ejemplo, cromo, cadmio, arsénico, plomo, entre otros), hidrocarburos aromáticos polinucleares, benceno y algunas veces solventes clorados, PCBs, etc. Estos compuestos químicos producen un efecto directo sobre la salud humana y varios de estos productos son cancerígenos (Fong, Quiñonez, Tejada, 2017).

El origen de estos metales es principalmente el desgaste del motor o maquinaria que lubricó. Otra fuente de contaminación es debida al contacto con combustibles, como es el caso de la presencia de plomo que proviene de la degradación del tetraetilo de plomo de las naftas. Con frecuencia se encuentran compuestos clorados, 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, el hollín, el agua y los sedimentos, tal como se muestra en la tabla 2 (Amesty *et al*, 2015; tomado de Martínez, 2005).

**Tabla 2.** Contaminantes presentes en el ALG

<b>Contaminante</b>	<b>Fuente</b>	<b>Concentración (ppm)</b>
Ba	Aditivos detergentes	<100
Ca	Aditivos detergentes	1000-3000
Pb	Gasolina con plomo/desgaste en cojinetes	100-1000
Mg	Aditivos detergentes	100-500
Zn	Antioxidantes/aditivos antidesgaste	500-1000
P	Antioxidantes/aditivos antidesgaste	500-1000
Fe	Cilindro, cigüeñal, agua, óxido	100-500
Cr	Cilindro, cigüeñal, anillos, refrigerante	Trazas
Ni	Anillos, Ejes	Trazas
Al	Émbolo, cojinetes, suciedad, aditivos	Trazas
Cu	Cojinetes, refrigerantes	Trazas
Sn	Desgaste en cojinetes	Trazas
Cl	Aditivos/gasolina con plomo	300
Si	Agentes des-espumantes/suciedad	50-100
S	Aceite base/productos de combustión	0.2-1%
Wáter	Combustión	5-10%

Fuente: Audibert, 2006

## **VII. 4 Impactos del ALG a la salud y al ambiente**

Los aceites son considerados potencialmente peligrosos para el ambiente debido a su persistencia y su habilidad para esparcirse en grandes áreas de suelo y del agua, formando un film que no permite el ingreso de oxígeno, lo que produce rápidamente una degradación de la calidad del ambiente. En el caso de los aceites gastados, existe el riesgo adicional de la liberación de los contaminantes tóxicos presentes, como es el caso de los hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales pesados y compuestos clorados (EPA, 1991).

Los aceites desechados en el suelo, pueden infiltrarse contaminando el agua subterránea, o escurrir y ser arrastrado por el agua de lluvia y contaminar los cursos de aguas. Si no se dispone adecuadamente, el aceite automotriz usado causa graves problemas al ambiente.

Si se arroja al suelo, este contiene una serie de hidrocarburos, metales y aditivos que favorecen su penetración y dispersión en el terreno, destruye el humus vegetal y acaba con la fertilidad del suelo (Nelson, 2001).

En el agua produce una película impermeable, que impide la adecuada oxigenación asfixiando a los seres vivos que la habitan: un litro de aceite contamina un millón de litros de agua. Asimismo, por su bajo índice de biodegradabilidad, afecta los tratamientos biológicos de las depuradoras de agua, llegando incluso a inhabilitarlos (Nelson, 2001).

Si el aceite usado se quema, sin un tratamiento y control adecuado, emite gases tóxicos debido a la presencia de plomo, cloro, fósforo, azufre, entre otros. Se estima que la quema de cinco litros de aceite, contaminan 1 millón de m<sup>3</sup> de aire, que es la cantidad de aire respirada por una persona durante tres años (Nelson, 2001).

El aceite gastado se encuentra en la lista de los RP ya que al hacer mala disposición contamina tanto las aguas subterráneas como superficiales, afecta la permeabilidad de la tierra y contamina el aire cuando es quemado ya que las emisiones además del CO<sub>2</sub> contiene metales pesados y sustancias tóxicas y la combustión incompleta genera dioxinas las cuales son altamente cancerígenas (Delgado *et al*, 2007).

Los aceites residuales de gran volumen se pueden convertir en valiosos productos de combustible mediante procesos de refinación y tratamiento (Ramesh, Narayana, 2016).



## **VII.5 Fundamento legal**

Tomando en cuenta los problemas que actualmente enfrenta nuestro país por la contaminación causada por el manejo inadecuado de los residuos, se han expedido leyes para prevenir su generación y, en caso de que los residuos se generen, o en caso contrario, valorizarlos y hacer más eficaz su gestión en todas las etapas de manejo.

El objetivo de estos ordenamientos es garantizar el derecho de toda persona a un ambiente adecuado, a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos. Este ordenamiento se conforma por el siguiente marco legal:

### **Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos**

Con fundamento en el capítulo 1, artículo 4°, párrafo 5°, establece que:

“Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley”.

### **Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)**

La LGEEPA nos indica en sus lineamientos el reciclaje, confinamiento y fundamento por el cual los gobiernos de la Federación, Entidades Federativas y Municipales tienen la responsabilidad de promover la adopción de medidas para reducir al máximo la generación de estos residuos.

## **Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR)**

La LGPGIR tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los RP, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación

### **Reglamento de la LGEEPA**

Es el ordenamiento de observancia general en todo el territorio nacional que tiene por objeto reglamentar la LGEEPA y define las competencias de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

### **Reglamento de la LGPGIR**

Es el ordenamiento que tiene por objeto reglamentar la LGPGIR y rige en todo el territorio nacional y las zonas donde la Nación ejerce su jurisdicción y su aplicación corresponde al Ejecutivo Federal, por conducto de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

### **NOM-052-SEMARNAT-2005**

Es la Norma Oficial Mexicana que establece el procedimiento para identificar si un residuo es peligroso, el cual incluye los listados de los residuos peligrosos y las características que hacen que se consideren como tales.

## **VII.6 Aceite lubricante gastado como residuo peligroso**

Según la NOM-052-SEMARNAT-2005, los residuos peligrosos son todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas inflamables o biológico-infecciosas (CRETIB) representan un peligro para el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud de la población en general.

El aceite lubricante usado o gastado, está estipulado como residuo peligroso en el artículo 31 sección I de la LGPGIR y se señalaba en la tabla 2 del anexo 3 de la NOM-052-ECOL-1993, en el No. De giro 1.1 con clave CRETIB: t,i (Tóxico-Inflamable).

Sin embargo, en la actualización de la NOM-052-ECOL-1993 a la actual NOM-052-SEMARNAT-2005 se dejan de mencionar los aceites lubricantes gastados como residuos peligrosos. Si un residuo no se alude a un fundamento legal que lo adjudique como un residuo peligroso, se realiza una caracterización o análisis CRETIB (corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable), basado en el conocimiento de origen o composición del residuo, aunque también se permite la manifestación basada en conocimiento científico o evidencia empírica, sobre los materiales y procesos empleados en la generación del residuo que declare su peligrosidad.

### **VII.6.1 Metales pesados**

Tradicionalmente se llama metal pesado a aquel elemento metálico que presenta una densidad superior a 5g/ml, aunque para efectos prácticos en estudios medioambientales se amplía esta definición a todos aquellos elementos metálicos o metaloides, de mayor o menor densidad, que aparecen comúnmente asociados a problemas de contaminación. Algunos de ellos son esenciales para los organismos en pequeñas cantidades, como el Fe, Mn, Zn, B, Co, As, V, Cu, Ni, o Mo, y se vuelven nocivos

cuando se presentan en concentraciones elevadas, mientras que otros no desempeñan ninguna función biológica y resultan altamente tóxicos, como el Cd, Hg y el Pb. Estos elementos tienen su origen en el substrato litológico, apareciendo bien como elementos nativos o incorporados normalmente en las estructuras de sulfuros, silicatos, carbonatos, óxidos e hidróxidos (Ortiz, Sanz, Dorado, Villar, 2007).

## **VII.7 Alternativas de reúso y disposición**

Según Baráibar (2016), estas son algunas de las distintas posibilidades y reúsos que se le puede aplicar al aceite lubricante gastado;

- La primera y mejor opción es devolver el aceite usado al productor. El aceite usado puede volverse a refinar en refinerías similares a aquellas utilizadas para el aceite crudo.
- En caso de que no sea posible un tratamiento se deberá recurrir a la combustión, destrucción, almacenamiento o depósito.
- Una opción ambientalmente aceptable de uso del aceite desechado es como combustible en hornos de cemento y cal, en hornos de ladrillo, u hornos metalúrgicos. Debido a la alta temperatura de combustión y las propiedades de absorción del cemento, cal y arcilla, los hidrocarburos peligrosos se destruyen y los metales pesados, azufre y cloruros son absorbidos. Los posibles efectos de contaminación del aire se ven minimizados con sofisticados sistemas de limpieza de gas, con que cuentan las plantas modernas.
- Los aceites gastados provenientes de motores también pueden ser utilizados como combustible para diferentes aplicaciones. En estos casos, el aceite usado se mezcla con aceite negro (aceite de alquitrán, aceite de carbonera) (por ej., panaderías), carbón de leña/ polvo de carbón mineral (hornos de cal) o pedazos de hule de llantas usadas (vehículos que producen asfalto).

- El aceite gastado de refinería se puede usar como combustible para la calefacción y generación de energía.
- Otro método sencillo para aprovechar el aceite gastado de motores es la producción de grasa para la fabricación de jabón. El aceite refinado se puede procesar adicionalmente para obtener grasa. Para ello el aceite se mezcla con estearato de sodio o calcio en recipientes de agitación caliente. El aceite gastado se agrega al jabón terminado mientras que este está aún caliente y suave, en una proporción de 20% de jabón a 80% de aceite usado.
- El aceite gastado de motores también se utiliza como agente protector de madera. Los postes de cercas, por ejemplo, se remojan con aceite usado para tornarlos resistentes contra el ataque de las termitas.
- En cuanto a la Incineración, esta vía destructiva se utiliza sobre todo cuando se comprueba la imposibilidad de reutilización debido a la presencia de ciertos tipos y niveles de contaminantes nocivos. Es el caso, por ejemplo, de la presencia de PCB, que sólo se destruyen satisfactoriamente mediante este proceso.

## **VII.8 Co-procesamiento de residuos peligrosos**

Esta etapa contribuye a la valorización de los RP, la LGPGIR hace alusión a este método como una alternativa ambientalmente sostenible y económicamente viable para el tratamiento y valorización de los residuos dados los estrictos parámetros de operación y monitoreo que se realizan durante todo el proceso.

El co-procesamiento es la integración ambientalmente segura de los residuos generados por una industria o fuente conocida, como insumo a otro proceso productivo (LGPGIR, 2003).

Existen algunas condicionantes para que los residuos o materiales puedan ser co-procesados:

- No deben poner en riesgo la integridad física de las personas.
- Deben ser compatibles con el proceso en el que se utilizarán

Como ejemplo, en el caso de la industria cementera la variedad de residuos y materiales que se co-procesan son:

- Líquidos: Aceites gastados, solventes, pinturas base solvente, anticongelante, etc.
- Sólidos: Impregnados con hidrocarburos, sólidos provenientes de diferentes procesos industriales, filtros de gasolina, materiales y medicinas caducas fuera de especificaciones, etc.
- Lodos: Tierras impactadas con hidrocarburos, lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua; aceitosos; de limpieza de tanques; de fosfatos; provenientes de diferentes procesos de fabricación, resinas, natas de pintura, etc.

### **¿Se requiere autorización para el co-procesamiento de residuos peligrosos?**

La respuesta es sí, requieren autorización de la SEMARNAT, tanto los generadores como los prestadores de servicios que realicen co-procesamiento de RP.

## **VII.9 Industria calera**

### **VII.9.1 Roca caliza**

La caliza es la roca sedimentaria química más abundante, ya que representa alrededor del 10% del volumen total de todas las rocas sedimentarias. Está compuesta fundamentalmente del mineral calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y se forma por medios inorgánicos o bien como resultando de procesos bioquímicos (Subsecretaría de minería, 2014; tomado de Tarbuk, 2005).

### **VII.9.2 Composición de la caliza**

Las calizas son rocas sedimentarias de origen fundamentalmente químico, formadas al menos por un 50% de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Las de origen bioquímico se forman por la acción de los seres vivos. Estos fijan el calcio disueltos en el agua y lo utilizan para construir sus esqueletos en forma de calcita o aragonito, cuando estos mueren, sus esqueletos darán unas calizas formadas por calcita, siempre el aragonito es inestable y se transforma en calcita, también se depositan calizas en los fondos marinos como consecuencia indirecta del metabolismo de los seres vivos (Guerrero, 2001).

### **VII.9.3 Hidróxido de calcio**

Es la sustancia química con la fórmula  $\text{Ca(OH)}_2$ , se obtiene al combinar el óxido de calcio con agua, dando como resultado el hidróxido de calcio. Es un material alcalino que puede incorporarse en exceso para neutralizar el ácido sulfhídrico y el dióxido de carbono (Secretaría de Economía, 2018).

#### **VII.9.3.1 Tipos de cal**

**Cal Viva;** Material obtenido de la calcinación de la caliza que, al desprender anhídrido carbónico, se transforma en óxido de calcio. La cal viva debe ser capaz de combinarse

con el agua, para transformarse de óxido a hidróxido y una vez apagada (hidratada), se aplique en la construcción, principalmente en la elaboración del mortero de albañilería (Subsecretaría de minería, 2014).

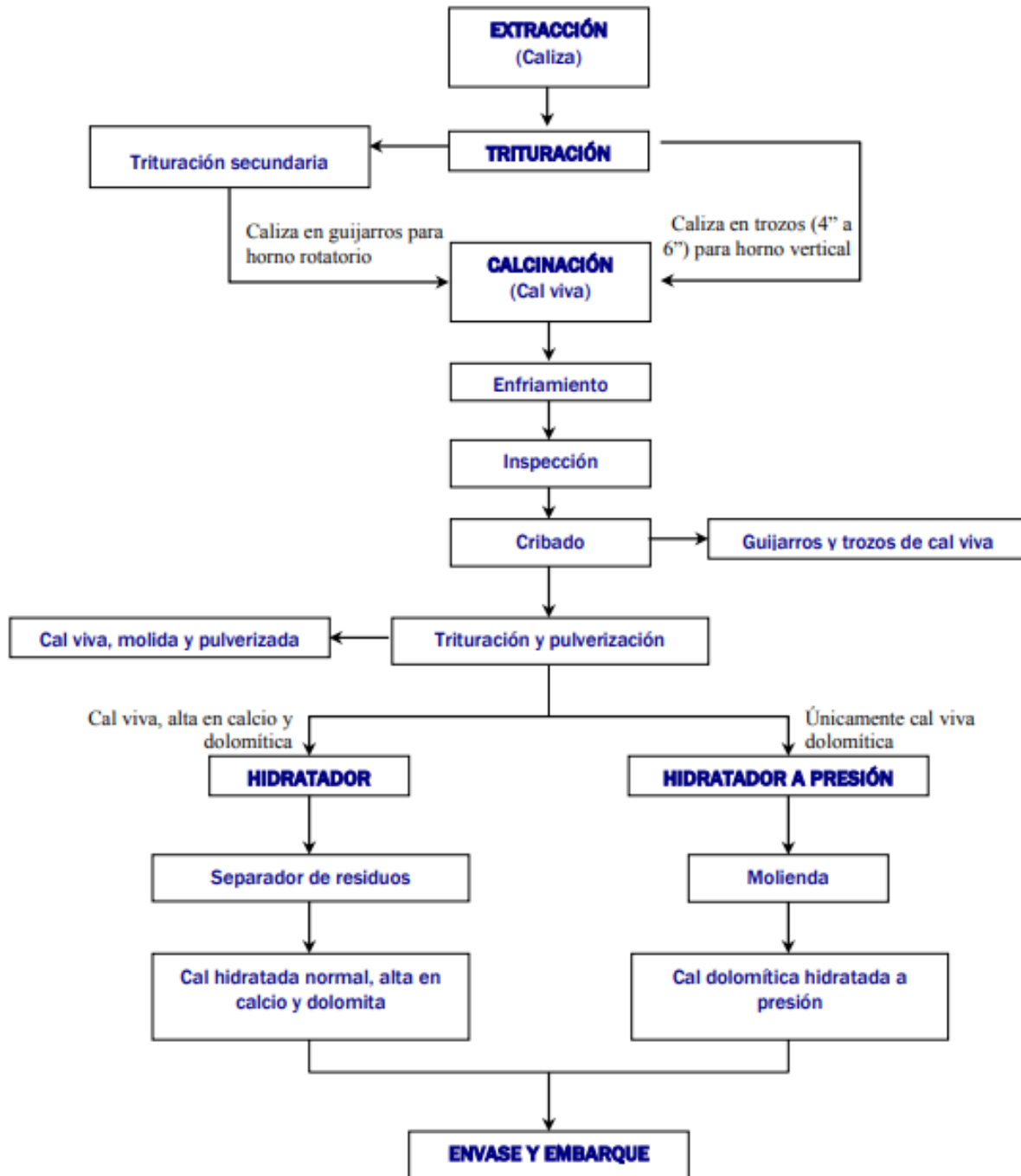
**Cal hidratada:** Se conoce con el nombre comercial de cal hidratada a la especie química de hidróxido de calcio, la cual es una base fuerte formada por el metal calcio unido a dos grupos hidróxidos. El óxido de calcio al combinarse con el agua se transforma en hidróxido de calcio (Subsecretaría de minería, 2014).

**Cal hidráulica:** Cal compuesta principalmente de hidróxido de calcio, sílica y alúmina o mezclas sintéticas de composición similar. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso debajo del agua (Subsecretaría de minería, 2014).

#### **VII.9.4 Procesos**

La cal es un óxido de calcio que se obtiene de la calcinación de rocas calizas, su proceso de elaboración consiste, explicado de forma general, en hacer maleable un material que en su forma natural no lo es. Se inicia con la extracción de rocas calizas en las canteras, para posteriormente quemarlas, dando como resultado la cal viva. Esta se mezcla con agua para obtener la cal apagada o hidratada y de esta forma darle el uso para el que esté destinada (Palma, 2009).





**Figura 1.** Proceso para la obtención de cal  
Fuente: Subsecretaría de minería, 2014; tomado de Kelly Errol G, 1990

A continuación, se presenta una descripción más detallada de cada uno de los procesos antes mencionados que especifica la subsecretaría de minería (2014);

**Extracción:** Se desmonta el área a trabajar y se lleva a cabo el descapote, posteriormente se barrena aplicando el plan de minado diseñado, se realiza la carga de explosivos y se procede a la voladura primaria, moneo, tumbe y rezagado, carga y acarreo a planta de trituración.

**Trituración.** En esta etapa es sometida a un proceso de trituración que arrojará como producto trozos de menor tamaño que normalmente son de 4" a 6", que serán calcinados en hornos verticales. La trituración secundaria se realiza cuando se requieren fragmentos de menor tamaño y se tienen hornos rotatorios para calcinar.

**Calcinación.** La cal es producida por calcinación de la caliza y/o dolomía triturada por exposición directa al fuego en los hornos. En esta etapa las rocas sometidas a calcinación pierden bióxido de carbono y se produce el óxido de calcio (cal viva).

**Enfriamiento.** Posteriormente se somete a un proceso de enfriamiento para que la cal pueda ser manejada y los gases calientes regresan al horno como aire secundario.

**Inspección.** El proceso siguiente es la inspección cuidadosa de muestras para evitar núcleos o piezas de roca sin calcinar.

**Cribado.** Se somete a cribado separando a la cal viva en trozo y en guijarros de la porción que pasará por un proceso de trituración y pulverización.

**Trituración y pulverización.** Este paso se realiza con el objeto de reducir más el tamaño y así obtener cal viva molida y pulverizada, la cual se separa de la que será enviada al proceso de hidratación

**Hidratación.** Consiste en agregar agua a la cal viva para obtener la cal hidratada. A la cal viva dolomítica y alta en calcio se le agrega agua y es sometida a un separador de

residuos para obtener cal hidratada normal dolomítica y alta en calcio. Únicamente la cal viva dolomítica pasa por un hidratador a presión y posteriormente a molienda para obtener cal dolomítica hidratada a presión.

**Envase y embarque.** La cal es llevada a una tolva de envase e introducida en sacos y transportada a través de bandas.

## **VII.10 Coque de petróleo**

El petroleum coke, o coque de petróleo, es un subproducto industrial granular similar al carbón que se separa durante el refinamiento del crudo pesado. El coque no es una tecnología nueva, ya que el primer coker moderno entró en línea en los Estados Unidos en la década de 1930 (Caruso *et al*, 2015).

Es un producto residual sólido de alto contenido energético, alto índice de pulverización, bajo en volátiles, alto contenido de azufre (alrededor de un 7%) y metales como el vanadio y níquel. Contiene un poder calorífico entre 30000 y 40000 kJ/kg dependiendo de las exigencias de refinación de los productos de valor agregado como la gasolina, turbosina, diesel, etc. (Rocha, 2011).

Aproximadamente el 90% (en masa) del coque de petróleo está compuesto de carbono, mientras que el hidrógeno, el nitrógeno, el oxígeno y el azufre constituyen la mayor parte del resto. En general, el petcoke contiene concentraciones relativamente altas de silicio y metales traza. Los niveles de metales presentes en el petcoke varían según las fuentes, pero el níquel y el vanadio son particularmente altos y, a menudo, superan los 100 ppm (Caruso *et al*, 2015).

La caracterización microscópica de 4 coques se muestra en la Tabla 3

**Tabla 3.** Propiedades del coque

Propiedades del coque							
Coke	%S	Metales (ppm)					Textura dominante
		Ca	Fe	Ni	Si	V	
A	3.61	70	210	210	320	490	Anisotrópico
B	4.03	20	50	280	40	540	Anisotrópico
C	5.37	80	410	230	130	500	Isotrópico
D	3.8	60	220	180	83	430	Anisotrópico

Fuente: Gagnon, 2016

El coque de petróleo se conforma principalmente de carbón y tiene un bajo contenido de cenizas. Las emisiones de dióxido de carbono proceden de la oxidación del carbono de los combustibles durante la combustión. En condiciones de combustión óptimas, el contenido total de carbono de los combustibles debería convertirse en CO<sub>2</sub>. Sin embargo, los procesos de combustión reales no son perfectos y la consecuencia de ello es que se producen pequeñas cantidades de carbono parcialmente oxidado y no oxidado (GCE, 2012).

La oxidación incompleta se produce como consecuencia de ineficiencias en la combustión. El flujo de carbono para un proceso de combustión típico se puede describir de la siguiente manera:

- La mayor parte del carbono es liberado de forma inmediata como CO<sub>2</sub>, en condiciones de combustión perfecta el total de carbono contenido en el combustible será convertido en CO<sub>2</sub> (GCE, 2012).
- Una pequeña fracción del carbono no se oxida inmediatamente como CO<sub>2</sub>. La mayor parte de esta fracción se emite en forma de gases distintos del CO<sub>2</sub> tales como el metano

(CH<sub>4</sub>), el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM) (GCE, 2012).

- El resto del carbono permanece sin quemar (es decir, no oxidado) en forma de hollín y ceniza. En general, se supone que esta fracción del carbono permanece almacenada indefinidamente (es decir, no se emite en forma gaseosa) (GCE, 2012).

## **VIII. MARCO METODOLÓGICO**

Para la realización de esta tesis, se hicieron distintas investigaciones, consultas y se fundamentó con fuentes bibliográficas, los esfuerzos se enfocaron en el seguimiento de la siguiente metodología relacionada con el cumplimiento de cada uno de los objetivos.

### **OBJETIVO 1**

Dimensionar la generación y disponibilidad de ALG en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez para conocer si puede abastecer la demanda de combustible que requiere la industria calera.

### **METODOLOGÍA 1**

1. Para conocer el dato más exacto de la generación de este residuo, se realizó una investigación con la SEMARNAT a través de una solicitud con el titular de transparencia de esta Secretaría, haciendo una solicitud formal en la plataforma Nacional de Transparencia del Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (INAI).
2. A través de la antes mencionada consulta, en un lapso de tiempo de 30 días hábiles, el titular de la unidad de transparencia proporcionó los datos del padrón de generadores de RP en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y las cantidades generadas por las diferentes clases de generadores de ALG en el año 2019.
3. Una vez que se ordenaron estos datos, se volvió a acudir con la Secretaría, mediante la plataforma de transparencia, para conocer la generación por periodo y el tipo de residuo que se generaron en Tuxtla Gutiérrez y el estado de Chiapas. Para esto se solicitó la información del periodo, los Números de Registro Ambiental (NRA), la generación de RP y el total de generación de ALG de dicho periodo.

4. Posteriormente se ordenaron los datos y se obtuvo la cantidad de ALG generado por las diferentes clases de generadores en el estado de Chiapas y su capital la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.
5. Para conocer la capacidad de recolección de ALG de una empresa que presta su servicio de recolección y transporte de RP, se realizó una consulta a una empresa particular autorizada por la secretaría para dimensionar la disponibilidad de recolección en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.
6. Se entrevistó al encargado, abordando preguntas acerca de las capacidades de recolección en un periodo de 30 días, así como también se determinaron los límites en las cantidades de ALG que puedan recolectar en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y en el resto del estado.

## **OBJETIVO 2**

Valorar la factibilidad de sustituir el combustible convencional por ALG en los procesos técnicos de la industria calera.

## **METODOLOGÍA 2**

1. Con el fin de conocer el combustible convencional y los procesos de esta industria, se realizó un oficio con apoyo de la coordinación del P.E de Ingeniería ambiental, dirigido a una industria calera que fabrica calhidra en Chiapas para solicitar un recorrido dentro de sus instalaciones.
2. Se obtuvo un resolutive positivo por parte de la industria, donde posteriormente se organizó una reunión con el gerente de la planta, en esta se detallaron los procesos que abarca la fabricación de la calhidra, considerando el tipo de combustible que quemaban, la cantidad que quemaban para su producción diaria, la cantidad de materia prima calcinada, la cantidad de cal producida y la inversión destinada al combustible convencional.
3. Con los datos obtenidos y con el sustento de fuentes bibliográficas, se interpretaron estos datos para ilustrar una comparativa del poder calorífico del combustible convencional, el ALG y otros combustibles comunes que están relacionados a este tipo de industria. La comparativa se enfocó en el poder calorífico, ya que los hornos de caliza necesitan un combustible con un poder calorífico adecuado para la calcinación de la materia prima.
4. Posteriormente se realizó una comparativa del poder calorífico del combustible convencional frente al ALG considerando el cálculo en Kcal con relación a su masa en Kg y tomando en cuenta la cantidad de energía que la industria calera requiere para sus procesos.



### **OBJETIVO 3**

Valorar la factibilidad económica de quemar ALG como combustible alternativo en una calera.

### **METODOLOGÍA 3**

1. Como parte del recorrido realizado en la industria calera, se conocieron los datos de la inversión que la industria destina para la adquisición de su combustible convencional.
2. Posteriormente se ordenaron estos datos de manera que se realizó una gráfica que relaciona la cantidad en toneladas del combustible adquirido con la inversión destinada en un periodo de 28 días. A su vez que se investigaron datos con sustento bibliográfico sobre el combustible convencional y su fluctuación en el mercado.
3. Con la finalidad de conocer los precios del servicio de recolección y transporte de una empresa autorizada por SEMARNAT, se realizó una solicitud con esta Secretaría para conocer el padrón de este tipo de empresas establecidas en Tuxtla Gutiérrez.
4. Se realizó una solicitud a una empresa autorizada de recolección y transporte de RP autorizados, en donde la respuesta fue positiva y se prosiguió a realizar una entrevista al encargado de dicha empresa.
5. Se obtuvieron los costos del servicio de recolección de ALG y con base a la información antes obtenida, se realizó una gráfica para comparar los precios del combustible convencional y el ALG.
6. Como sustento a la investigación realizada con la industria de transporte y recolección, se realizó una estimación de precio en un tabulador digital, para estimar el precio aproximado del transporte de 1 bidón con 1000 L de RP hacia un sitio de disposición en específico.

7. Una vez obtenido estos datos, se realizó una investigación en la plataforma de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) para conocer los costos de los trámites de autorización que tendría que pagar la industria calera para poder disponer el ALG como combustible.
8. Posteriormente se conocieron los requerimientos por los que la industria tiene que cumplir para recibir la autorización, entre ellos está la construcción de un almacén temporal de RP para almacenar el ALG que fuesen a utilizar como combustible.
9. Con la finalidad de conocer el costo de la construcción de un almacén temporal de RP, se consultó un Manifiesto de Impacto Ambiental realizado por una empresa particular que detalla la inversión que conlleva la construcción de dos almacenes temporales de RP con un volumen de almacenamiento capaz de cubrir la demanda diaria de combustible que la industria calera necesita.

#### **OBJETIVO 4**

Valorar la factibilidad ambiental y determinar las posibles alternativas para el pretratamiento del ALG.

#### **METODOLOGÍA 4**

1. Una vez que se tuvo conocimiento del combustible convencional utilizado por la industria calera, se realizó un análisis para valorar la factibilidad ambiental de sustituirlo el por ALG con el sustento de referencias bibliográficas y consultas con la SEMARNAT.
2. Se realizó una consulta a la SEMARNAT a través de la plataforma de transparencia del INAI, para tener una referencia de las industrias que utilizan ALG como combustible alternativo para sus procesos. Donde se pudo conocer que este padrón estaba conformado en su mayoría por industrias cementeras.
3. Posteriormente se realizó una investigación con fuentes bibliográficas para obtener los datos de las temperaturas y tiempos óptimos para quemar el ALG y destruir los componentes que lo vuelven un RP.
4. Con base en el recorrido realizado en la industria calera, se pudo conocer el tipo de horno que utiliza y la temperatura en la que se quema el combustible, posteriormente se interpretó esta información para confirmar si la teoría que afirma la destrucción de los componentes peligrosos de un RP a ciertas temperaturas puede aplicar o no en un horno de la industria calera.
5. Luego de conocer estos datos, se realizó una investigación con fuentes bibliográficas para determinar qué tipo de contaminantes pueden persistir después de pasar por el proceso de incineración.
6. Aunado a esto, se llevó a cabo otra investigación para determinar la propiedad del óxido de calcio para absorber los contaminantes que persistan durante la

incineración y se investigaron antecedentes de su aplicación en distintos tratamientos para remover contaminantes.

7. Una vez que se pudo conocer la factibilidad de quemar ALG sin que represente un impacto significativo al medio ambiente se realizó una investigación con sustento bibliográfico donde se describen los tipos de pretratamientos a los que se podría someter el ALG en caso de que los contaminantes persistentes se emanen a la atmósfera en forma de emisiones y no queden absorbidos por el óxido de calcio.
8. Con información bibliográfica se detallaron 4 posibles alternativas de tratamiento, donde se expresaron los procesos y los porcentajes de remoción de contaminantes de cada tratamiento para liberar al ALG de los componentes que lo vuelven peligroso antes de ser quemado.

## IX. RESULTADOS

### IX.1 Disponibilidad de aceite lubricante gastado

En las siguientes tablas se expresan las cantidades de ALG que llegaron a generar las empresas registradas como micro, pequeños y grandes generadores de residuos peligrosos en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en el año 2019, información que fue proporcionada por la SEMARNAT:

**Tabla 4.** Cantidad de ALG generado en Tuxtla Gutiérrez en 2019

Año 2019	Cantidad en toneladas	Total (ton)
Enero	0.460155	34.40
Febrero	0.400155	
Marzo	2.6754	
Abril	10.0895	
Mayo	1.949855	
Junio	1.12365	
Julio	3.260641	
Agosto	11.04396	
Septiembre	0.9228	
Octubre	0.470858	
Noviembre	0	
Diciembre	2.00000	

De la misma manera se investigaron las cantidades de RP reportadas desde el periodo 2004-2019 por tipo y corriente de RP en el estado de Chiapas.

Como resultado de la consulta con la SEMARNAT, se proporcionaron los datos del periodo, los NRA, la generación de RP y el total de generación de ALG de dicho periodo.

A continuación, se presentan los datos catalogados en la categoría de "Generación de aceites gastado".

**Tabla 5.** Generación por periodo y tipo de residuo

Periodo	Entidad	Total de NRA	Total de Generación de RP (Ton)	Total de generación de aceites gastados (Ton)
2004-2019	Chiapas	3512	3324,08	1285,83

Los Aceites Gastados y su total de generación antes citado pertenecen al dato total de los residuos de aceites que provinieron de distintos sectores y actividades en el estado de Chiapas. Estas subcategorías y sus cantidades individuales se reportan en la siguiente tabla con la información que proporcionó la SEMARNAT.

**Tabla 6.** Cantidad de aceite gastado en el periodo 2004-2019

Tipo de Aceite gastado							
	Aceites Gastados Dieléctricos	Aceites Gastados Lubricantes	Aceites Gastados Hidráulicos	Aceites Gastados Solubles	Aceites Gastados Templado Metales	Otros Aceites Gastados	TOTAL
Cantidad (Ton)	2,7	1.221,42	33,32	12,95	0,22	15,22	1.285,83
Porcentaje %	0.2%	95%	2.59%	1%	0.01%	1.18%	100%

Las cantidades de ALG forman parte de la categoría de Aceites Gastados, provenientes de distintas clases de generadores de RP en el estado.

Los Aceites Gastados son una de las categorías que la Secretaría utiliza para clasificar algunos RP. Esta y otras categorías conforman el dato total de generación de residuos peligrosos en el periodo de 2004-2019. Los generadores y cantidad de RP que anteriormente se generó en el estado se reportan en la tabla 7:

**Tabla 7.** Clases de generadores y cantidad generada de RP en Chiapas en el periodo 2004-2019

Clase de generador	Cantidad	Estimación de generación de RP (Ton)	Total de generación de RP (Ton)
Microgenerador	2840	281,08	3324
Pequeño generador	628	1666,47	
Gran generador	44	1376,53	

Hasta el 2019, en Chiapas existían 3512 personas físicas y morales registradas como generadores de RP, de esta cifra, 2840 son microgeneradores, 628 pequeños generadores y 44 grandes generadores.

Los microgeneradores son establecimientos industriales, comerciales o de servicios que generan una cantidad de hasta 400 kilogramos de RP al año. El pequeño generador genera una cantidad igual o mayor a 400 kilogramos y menor a 10 toneladas al año y un gran generador genera una cantidad igual o superior a 10 toneladas al año (LGPGIR, 2003).

### **IX.1.1 Disponibilidad de recolección y transporte**

Las cantidades reportadas por SEMARNAT son datos oficiales de ALG que se llegaron a generar en el estado de Chiapas. Sin embargo, también se realizó una investigación con una empresa autorizada para la recolección y transporte de RP y de esta manera conocer la capacidad de recolección que tienen. La empresa de recolección en Chiapas ha podido recolectar hasta una capacidad de ALG de entre

**3000 y 50,000 L/mes.**

Ya que este es un servicio profesional bajo demanda que cuenta con honorarios, se adaptan a la necesidad de quien solicita sus servicios, por lo que estas empresas no tienen un límite de cobertura, se puede recolectar ALG a nivel nacional para la demanda de quien lo vaya a disponer.



## IX.2 Eficiencia técnica

Con base en la investigación realizada en la industria de calhidra en Chiapas, se pudieron conocer los siguientes datos que permiten interpretar la viabilidad técnica del combustible alternativo frente al combustible convencional.

El combustible utilizado en los procesos de producción de la calera es el Pet Coke (petroleum coke) o coque de petróleo.

Con base en la investigación realizada en el recorrido en una industria calera, se determinó que se quema alrededor de 19 toneladas de coque de petróleo para su producción diaria. Esta cantidad de combustible se usaba para calcinar 100 toneladas de piedra caliza para la producción de 55 ton/día de CaO.

Las cantidades mencionados se expresan en toneladas en la tabla 8:

**Tabla 8.** Relación del combustible y materia prima necesarias para crear CaO.

Cantidad de combustible (ton)	Materia prima calcinada	Cal producida
1	5,26	2,89
3	15,7	8,6
6	31,5	19,36
12	63,15	34,7
15	78,9	43,42
19	100	55,0

En hornos como los de la industria cementera y calera, realizan sus procesos con un exceso de oxígeno que debe limitarse para no sacrificar en exceso la eficiencia energética que se encuentra condicionada, además, a la uniformidad del combustible y a su adecuado manejo para facilitar una correcta y completa combustión (Andrade *et al*, 2017).

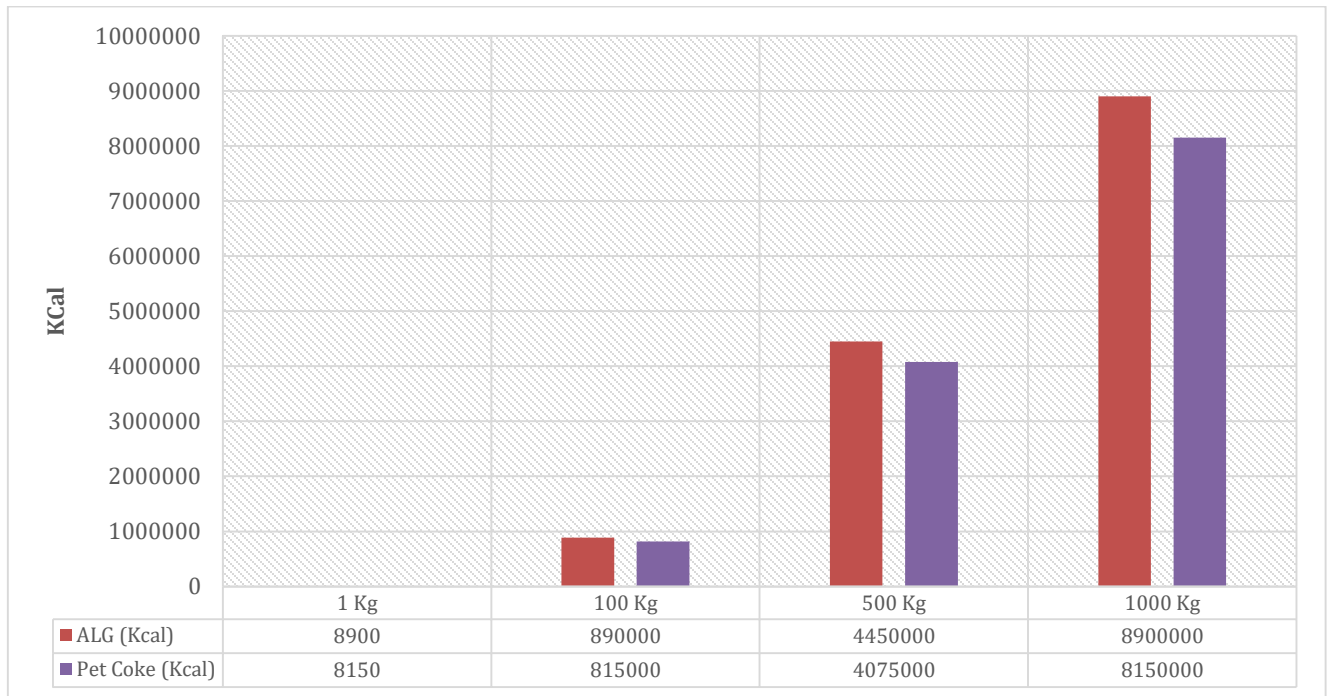
El grado de sustitución de los combustibles convencionales por combustibles alternos en un horno de caliza depende del poder calorífico del combustible identificado. La relación de distintas clases de combustibles con su poder calorífico se expresa en la tabla 9:

**Tabla 9.** Poder calorífico de algunos combustibles

Clase de combustible	Poder calorífico (Kcal/Kg)
COQUE	7100
PET COKE	8150
CARBÓN MINERAL	5100-5500
Fuel-oil n°1	9700
Fuel-oil n°2	9500
RESIDUO PETROLERO TIPO A	9200-9800
ACEITE LUBRICANTE USADO	8900-9000

Fuente: UCEM planta Chimborazo, 2015

Con base en la investigación en la industria calera, se sabe que para calcinar la materia prima se necesita un aproximado de 5.1 GJ de energía por tonelada de cal (5.1GJ/ton). Se sabe que la industria utilizaba coque de petróleo para sus procesos, por lo que el valor comparativo de las propiedades caloríficas es de 8150 Kcal/Kg (Ibrahim, 2016). Mientras que el poder calorífico del ALG, según López (2016) es entre 8900 y 9000 Kcal/Kg, en la figura 2 se expresa la comparativa de ambos poderes caloríficos.

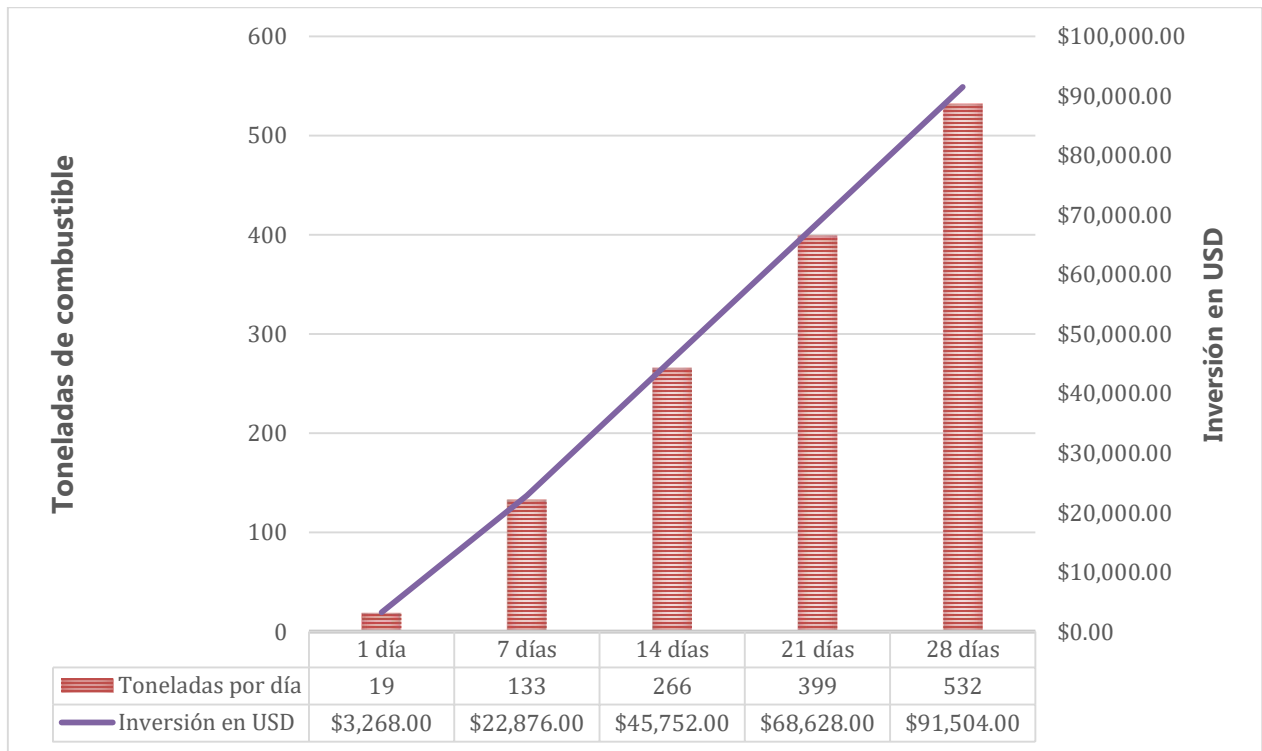


**Figura 2.** Gráfica comparativa de propiedades caloríficas

### IX.3 Factibilidad económica ambiental

Con base en los datos obtenidos en la investigación en la industria calera, la inversión destinada en 2019 para comprar el combustible convencional que utilizan para sus procesos, en este caso coque de petróleo fue de \$172 USD/ton.

Las cifras destinadas a la inversión en el lapso de un mes se ven reflejada en la figura 3:



**Figura 3.** Inversión económica destinada al combustible convencional en USD

Varios factores influyen el precio de mercado del coque de petróleo. Cuando el precio internacional del carbón aumenta, la demanda por coque de petróleo también aumenta. En la visión de los analistas, el alza del precio internacional del carbón generalmente es lo que más influencia el alza del precio del coque de petróleo (Santos, 2008).

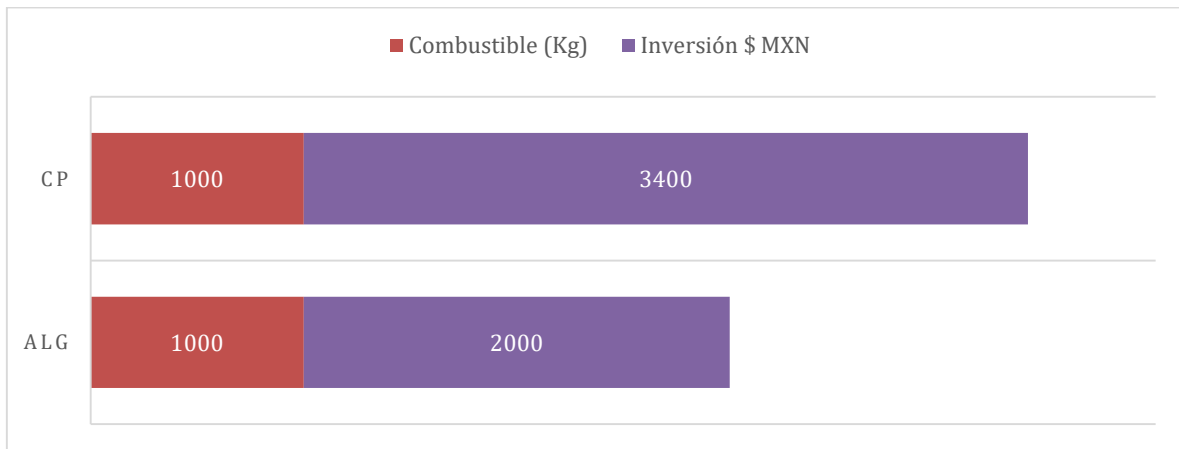
El coque de petróleo, en lo sucesivo denominada PetCoke, es un subproducto creado en refinerías que están equipadas con cokers. Es un subproducto del craqueo de combustibles más ligeros, la oferta de PetCoke aumentará junto con la creciente demanda de gasolina. Ya que PetCoke es un residuo de un combustible terminado, siempre será más barato que el combustible terminado (Darren, 2015).

### IX.3.1 Costos de transporte y recolección

El precio que una empresa de transporte y recolección llegó a cobrar por litro recolectado de ALG es de

\$2.00 MXN/L de ALG.

La comparación del precio del coque de petróleo y el ALG se ve expresado en la figura 4:



**Figura 4.** Relación de costos de ALG y CP

Para tener una referencia del precio estándar que puede tener el transporte de RP, se realizó una consulta hipotética en el software para arquitectura, ingeniería y construcción del grupo CYPE Ingenieros S.A. de C.V. del año 2019, que tabula un precio

aproximado a la realidad para el transporte de “un bidón de 1000 litros de capacidad con residuos peligrosos a basurero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos” (tabla 10).

**Tabla 10.** Estimación del precio para transportar 1000 L de RP

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
Transporte de bidón de 1000 litros de capacidad, apto para almacenar residuos peligrosos, a basurero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición o centro de valorización o eliminación de residuos,	1000	1.700,10	1.700,10
	<b>Subtotal:</b>		<b>1.700,10</b>
Otros costos	2	17,00	34,00
	<b>TOTAL</b>		<b>1.734,10</b>

Fuente: CYPE ingenieros, 2019

### **IX.3.2 Costos de la autorización para quemar ALG**

La autorización para quemar ALG como combustible alternativo que otorga la SEMARNAT conlleva una serie de inversiones que constan de un almacén temporal de RP que almacene el ALG dentro de las instalaciones de la calera, y el pago correspondiente al trámite:

SEMARNAT-07-033-C - Reciclado o co-procesamiento de residuos peligrosos.

Tiene el costo de: \$3,174.15 MXN

Aunado a esto, una industria calera es considerada una fuente fija de jurisdicción federal de emisiones a la atmósfera, según lo estipulado en el Artículo 111 BIS de la LGEEPA, por lo que es responsable de tener en vigencia una autorización basada en la regulación para la operación y funcionamiento de las fuentes fijas de jurisdicción federal en materia de atmósfera, denominada Licencia Ambiental Única (LAU):

Tiene el costo de: \$3,174.00 MXN

Así mismo se tiene que considerar que la industria cuente con su Cédula de Operación Anual (COA). Este trámite sirve para reportar las emisiones y transferencias de los establecimientos sujetos a reporte de competencia federal como las fuentes fijas de jurisdicción federal. El trámite no presenta ningún costo por parte de alguna dependencia de gobierno.

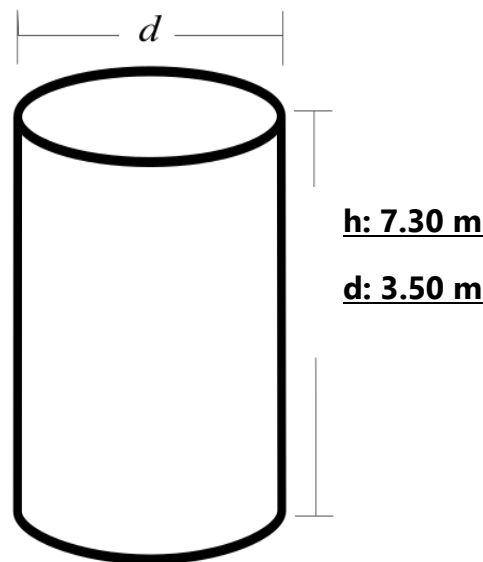
Con la construcción de un almacén, la industria calera estaría cumpliendo con el requisito para almacenar temporalmente el RP, en lo que es incorporado como combustible alternativo en sus procesos, aunado a esto, puede solventar la necesidad de disponer los RP de los micros, pequeños o grandes generadores de RP (principalmente talleres mecánicos y empresas de servicios), principalmente por que la dispersión actual de estos dificulta el manejo adecuado de sus residuos en el estado.

Según SIRESA (2005), se estima que el importe del capital total requerido para la construcción de un almacén temporal para 100,000 l de aceite usado es de

\$2, 000,000.00 mxn.

Los costos en infraestructura como son diques de contención, fosas de retención y trampas, para el control y atención a contingencias representa más del 40% de la inversión total. Estima que al menos un 15% del monto de la inversión es referente a las medidas de prevención y mitigación de impactos que pudieran presentarse (SIRESA, 2005).

SIRESA, (2005) contempla en la inversión la instalación de dos tanques de almacenamiento vertical que tienen las siguientes dimensiones:



**Figura 5.** Dimensión de 1 almacén temporal para RP

El almacén es exclusivamente para ALG, los cuales pueden contener un volumen de 50,000 litros cada uno con un volumen total de 100,000 litros y contruidos de acero A-



36. Estos tanques almacenarán cualquier aceite que haya sido refinado del petróleo crudo o cualquier aceite sintético que haya sido usado.

Los tanques de almacenamiento contemplan la construcción de un dique de contención perimetral con un volumen de almacenamiento de aproximadamente 25,000 litros y registros que conducirán cualquier posible derrame a una trampa de aceite ubicada a un costado del área de almacenamiento de residuos líquidos.

#### **IX.4 Eficiencia ambiental**

Valorar la eficiencia ambiental de incorporar ALG en lugar de coque de petróleo va de acuerdo a que la sustitución total o parcial del combustible convencional por el combustible alternativo no genere mayores impactos ambientales negativos que puedan poner en riesgo la salud de los seres vivos y el equilibrio ecológico.

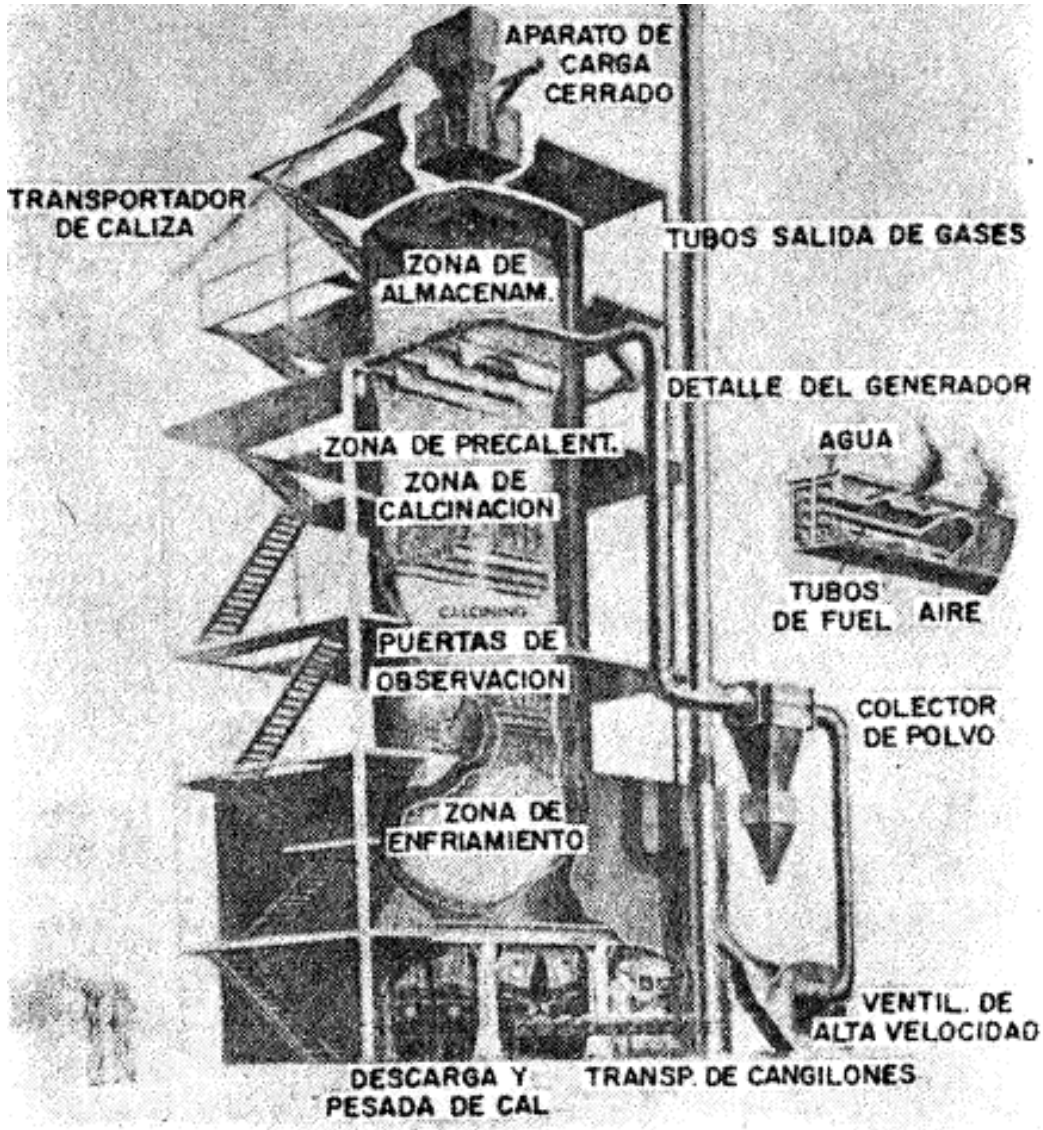
La valorización energética tiene por objetivo la sustitución parcial de los combustibles fósiles tradicionales por combustibles derivados de residuos, mediante la generación de energía y/o la recuperación de calor; sin poner en riesgo la salud humana y sin la utilización de métodos que puedan dañar al ambiente (Andrade *et al*, 2017).

Se ha tomado como referencia a la industria de cemento, el cual ya tiene antecedentes de incluir el ALG como combustible alternativo en sus procesos de producción, un proceso posible en esta industria gracias a las altas temperaturas de sus hornos.

En la industria calera, con base en la investigación realizada en las instalaciones, se conoce que la temperatura en los hornos verticales es de 1200°C con un tiempo de retención de 2 segundos.

Es menester la temperatura empleada para la combustión de un componente. Para la destrucción de componentes inorgánicos, durante la incineración se necesita una temperatura superior a 850 a 1100°C por al menos 2 segundos para la destrucción de los componentes que vuelven al ALG un RP (López, 2016).

Las temperaturas entre 850 y 1000°C pueden considerarse apropiadas para destruir residuos peligrosos no halogenados, mientras que las temperaturas entre 1100°C y 1200°C se consideran apropiadas para disolver compuestos halogenados, es decir, PCDD/PCDF, PCB y HCB (Secretaría del Convenio de Estocolmo, 2008).



**Figura 6.** Horno vertical en la industria calera  
Fuente: Schwarzkopf, 1970

Los contaminantes peligrosos que representan un riesgo para la salud humana y el medio ambiente serán destruidos por las altas temperaturas de los hornos en el proceso de calcinación. Sin embargo, es muy probable que el contaminante que persista después de este proceso sean los metales pesados, ya que estos no pueden ser degradados o destruidos (Ferré, 2007).

Sin embargo, es muy probable que las emisiones no contengan metales pesados debido a que el óxido de calcio tiene propiedades de absorción que los puede remover durante el proceso de calcinación (Hooda, 1996). Esta propiedad del óxido de calcio es utilizada en el tratamiento de suelos, agua y aire porque puede remover la mayoría de metales pesados en el proceso (subsecretaría de minería, 2014).

## **IX.5 Posibles alternativas para el pretratamiento del ALG**

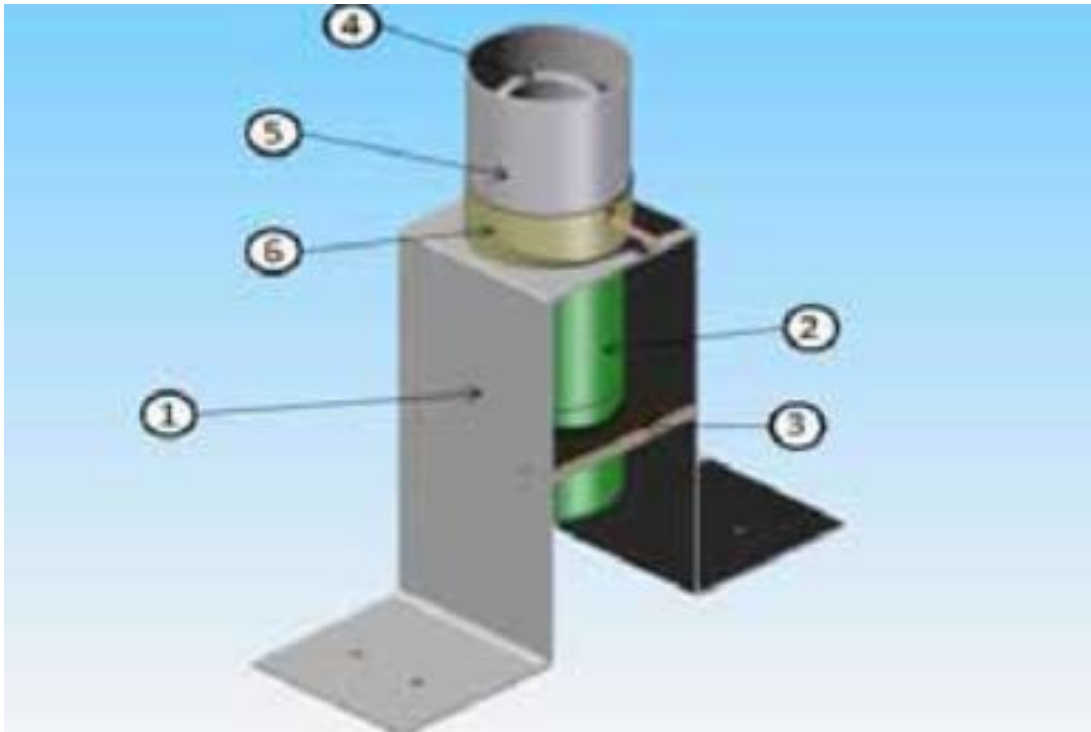
Existen varios métodos para el tratamiento de los aceites usados, los cuales buscan obtener material que sea combustible, que no dañe los equipos y cause el menor impacto al ambiente cuando se combustione a determinadas temperaturas, algunos de estos tratamientos propuestos por Delgado *et al*, 2007 son detallados a continuación.

### **IX.5.1 Centrifugación**

Este principio aprovecha la acción de la masa cuando está sometida a altas velocidades que permite la separación del material suspendido en el aceite por la variación de la masa, colocando en rotación una muestra para separar por fuerza centrífuga sus componentes sólidos de los líquidos. En este caso se busca separar las partículas del aceite obteniendo así una muestra con baja concentración de impurezas sólidas. El material particulado, de mayor densidad que el aceite, tiende a moverse en dirección opuesta a la fuerza de centrifugado, y se separa cuando llega al fondo del recipiente (Delgado *et al*, 2011).

La fuerza que imprime a la mezcla un movimiento rotatorio con una fuerza de mayor intensidad que la gravedad, provocando la sedimentación del sólido o de las partículas de mayor densidad. Todas las partículas, por poseer masa, se ven afectadas por cualquier fuerza (origen de una aceleración) (Delgado *et al*, 2011).

La fuerza centrífuga es la que tiende a alejar los objetos del centro de rotación mediante la velocidad tangencial, perpendicular al radio, bajo un movimiento circular. Las centrífugas de aceite son reconocidas por una filtración superior en flujo parcial removiendo contaminantes del aceite lubricante de motores (Delgado *et al*, 2011).



**Figura 7.** Diseño de centrífuga para ALG  
Fuente: Delgado *et al*, 2011

**Tabla 11.** Piezas de la centrifugadora

PIEZA N°	DESCRIPCIÓN
1	Soporte Motor
2	Motor
3	Soporte centro
4	Vaso centrifugador
5	Recipiente aceite centrifugado
6	Soporte recipiente

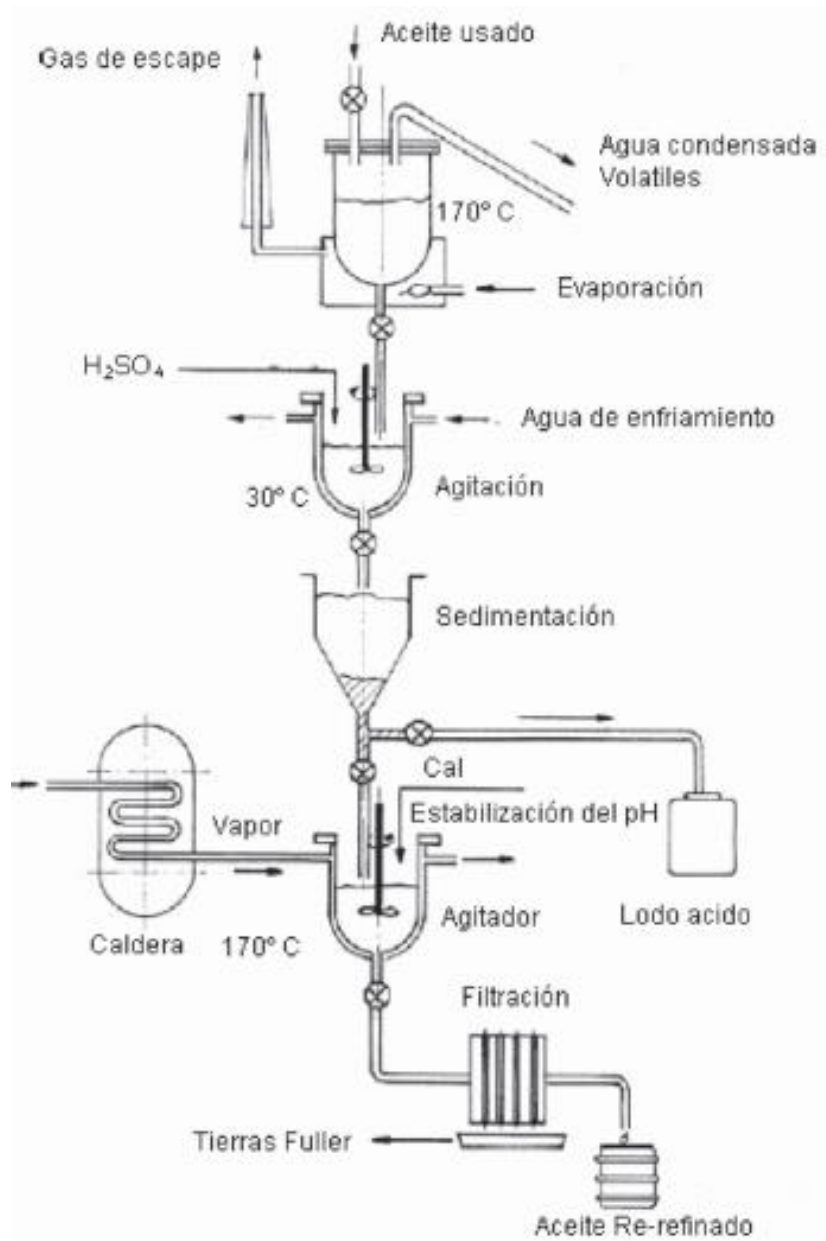
Fuente: Delgado *et al*, 2011

### **IX.5.2 Proceso ácido-arcilla**

La carga de lubricante usado es sometida a una evaporación de aquellos productos ligeros como agua e hidrocarburos del rango de la gasolina. Después de este paso previo la carga se trata con ácido sulfúrico obteniéndose un rendimiento de 85% aproximadamente en relación con el producto tratado. El resto constituye un residuo aceitoso y ácido.

El producto obtenido después del tratamiento ácido es enviado a filtración con arcilla y cal, para mejorar su color y su acidez. En la filtración se obtiene un desecho del 3 al 4 por ciento constituido por una mezcla de aceite ácido y arcilla.

El proceso tiene un rendimiento global de 70% en peso. El esquema del proceso se ve en la siguiente figura:



**Figura 8.** Esquema del proceso ácido-arcilla.  
Fuente: Delgado et al, 2007



El método consiste en las siguientes operaciones:

- **Evaporación:** En aceite se calienta hasta 100°C para permitir la evaporación del contenido de agua. Arriba de 100°C se eliminan otras materias volátiles como gasolina o solventes orgánicos que pueden haberse mezclado con el residuo de aceite.
- **Agitación:** Luego de alcanzar la temperatura de 170°C, el aceite debe ser enfriado a una temperatura de aproximadamente 30 a 40°C para permitir la adición del ácido sulfúrico concentrado a una cantidad de un 10% de la cantidad del aceite. La mezcla se agita constantemente durante 3 a 4 horas para permitir la reacción del ácido con las impurezas formando sulfatos.
- **Sedimentación:** La mezcla de aceite-ácido se colocará en un recipiente de acero de forma cónica en el extremo inferior donde se mantendrá un día para permitir que los sedimentos insolubles se decanten en el cono del fondo, después, el lodo ácido se extrae y se vierte en recipientes de almacenamiento de aceite para su depósito.
- **Estabilización del pH:** La mezcla restante de aceite-ácido transparente se traslada a un recipiente para realizar nuevamente la agitación, en la cual se mezcla el aceite-ácido con ceniza de soda a una temperatura de 170°C. El proceso total demora entre 2 y 4 horas. La cal reacciona con el ácido neutralizando el aceite a un pH 7.
- **Filtración:** Al final del tratamiento con cal, es necesaria la filtración del aceite por medio de tierra fuller o diatomacea que permite la retención de impurezas y productos del proceso de degradación para garantizar la purificación del aceite (Delgado *et al*, 2007).

### **IX.5.3 Extracción por solvente**

Según Delgado *et al* (2007), esta técnica es uno de los procesos más económicos y más eficientes en la recuperación de aceites usados. Este proceso reemplaza el proceso de ácido-arcilla produciendo un lodo orgánico útil en lugar de un lodo tóxico. Al final, este proceso es capaz de remover entre 10-14% del aceite usado como contaminante, lo cual corresponde a la cantidad de aditivos e impurezas que normalmente se encuentran en el aceite usado. El sistema debe tener la capacidad de separar el máximo posible de lodos del aceite usado y al mismo tiempo perder la mínima cantidad de base lubricante en los lodos. El proceso es el siguiente:

- **Sedimentación:** El aceite usado se guarda en un tanque con fondo cónico para permitir la sedimentación de partículas grandes, se deja en el tanque por 3 días para homogenizarlo.
- **Adición del solvente:** Se adiciona al aceite usado el solvente (se recomienda usar: 2-propanol, MEK o 1-butanol). El proceso consiste en mezclar el aceite usado y el solvente en proporciones adecuadas para asegurar una completa miscibilidad de la base lubricante en el solvente. El solvente debe retener los aditivos y las impurezas orgánicas que normalmente se encuentran en los aceites usados.
- **Agitación:** Se agita a 275 rpm durante 15 minutos, estas condiciones aseguran un mezclado adecuado. La mezcla se deja sedimentar por 24 horas, estas impurezas floculan y sedimentan por acción de la gravedad.
- **Lavado:** Después de esto se lavan los lodos usando 2-propanol y n-hexano, este proceso de lavado remueve un 95% del aceite intersticial presente en los lodos.
- **Evaporación:** Siguiendo el proceso de lavado, los lodos se llevan al horno por 5 minutos a 100°C para evaporar el exceso de solventes.

Las pérdidas del aceite se calculan como el peso de los lodos húmedos antes de lavarlos menos el peso de los lodos secos sobre el peso del aceite adicionado en la mezcla. Se recupera el solvente por destilación para propósitos de reciclaje.

#### **IX.5.4 Proceso de Berk (Sedimentación-filtración)**

Este proceso provee una recuperación promedio de la base 95% en peso con una reducción de cenizas del 75%

- Evaporación: En este proceso el aceite se calienta hasta 170°C, deteniéndose a 100°C para permitir la evaporación del contenido de agua. Arriba de 100°C se eliminan otras materias volátiles como gasolina o solventes orgánicos que pueden haberse mezclado con el residuo de aceite.
- Adición del solvente: Se adiciona al aceite usado el solvente 2-propanol-metilcetona-1-butanol con una relación de aceite de 3:1. El solvente debe retener los aditivos y las impurezas orgánicas que normalmente se encuentran en los aceites usados.
- Sedimentación: Se logra una precipitación de lodos que se consigue con el uso del solvente.
- Filtración: Al final es necesaria la filtración del aceite por medio de tierra fuller o diatomácea que permite la retención de impurezas y productos del proceso de degradación para garantizar la purificación del aceite (Delgado *et al*, 2007).

## **IX.6 Autorización para el aprovechamiento energético de residuos peligrosos**

En este punto, se consultó la LGPGIR y su reglamento, determinando lo siguiente.

En el Reglamento de la LGPGIR en su artículo 48 establece:

Para obtener autorización, en términos del artículo 50 de la Ley, con excepción de la importación y exportación de residuos peligrosos que se sujetarán a lo previsto en el Título Quinto de este Reglamento, los interesados deberán presentar solicitud, mediante formato que expida la Secretaría.

El formato de la solicitud contendrá la siguiente información:

- I. Datos generales de la persona, que incluyan nombre, denominación o razón social, domicilio, teléfono, fax, el domicilio o dirección electrónica para recibir notificaciones y ubicación de las instalaciones expresada en coordenadas geográficas. En este apartado, el solicitante señalará la información que clasifique como confidencial en términos de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública Gubernamental;
- II. Nombre y firma de los representantes legal y técnico de la empresa, lo cual se podrá sustituir con el número de Registro Único de Personas Acreditadas en los términos del artículo 69-B de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo;
- III. Número de la autorización en materia de impacto ambiental, en el caso de que la actividad sea de las consideradas en el artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente;
- IV. Número de autorización del Programa de Prevención de Accidentes en materia de riesgo ambiental, cuando la actividad sea considerada altamente riesgosa;

- V. Descripción e identificación de cada uno de los residuos peligrosos que se pretenden manejar, donde se indiquen sus características físicas, químicas o biológicas, y cantidad anual estimada de manejo;
- VI. La capacidad anual estimada de las instalaciones en donde se pretende llevar a cabo la actividad de manejo.
- VII. Indicación del uso del suelo autorizado en el domicilio o zona donde se pretende instalar;
- VIII. La actividad que se pretenda realizar, misma que se describirá de acuerdo con lo establecido en el artículo 49 de este Reglamento;
- IX. La fecha de inicio de operaciones y la inversión estimada del proyecto;
- X. Las acciones a realizar cuando arriben los residuos peligrosos a la instalación en donde se llevará a cabo la actividad respectiva, incluyendo las de descarga y pesaje de los mismos, y aquéllas que se realicen para confirmar la información a que se refiere la fracción V del presente artículo, así como los movimientos de entrada y salida de la zona de almacén;
- XI. El tipo de almacenamiento, envasado o a granel, y la capacidad de almacenamiento para los residuos peligrosos dentro de las instalaciones antes de su manejo específico, excepto centros de acopio;
- XII. La descripción de los equipos a emplear en la actividad de manejo, detallando sus sistemas de control;
- XIII. La información de soporte técnico de los procesos o tecnologías a los que se someterán los residuos peligrosos, así como elementos de información que demuestren, en la medida de lo posible, que se propone la mejor tecnología disponible y económicamente accesible, así como las formas de operación acordes con las mejores prácticas ambientales;
- XIV. Las medidas de seguridad implementadas en todo el proceso;

- XV. Las características de los residuos generados durante la operación de manejo, la cantidad estimada que se generará y el manejo que se les dará, y
- XVI. La propuesta de seguros o garantías financieras que, en su caso, se requieran en los términos de los artículos 76 y 77 de este Reglamento.

Aunado a esto, el reglamento de la LGPGIR en su artículo 49, fracción III, establece que la información relativa a la actividad para la cual se solicita la autorización describirá lo siguiente para el caso de reciclaje o co-procesamiento de RP fuera de la fuente que los generó:

- a)** Los procedimientos, métodos o técnicas de reciclaje o co-procesamiento que se proponen, detallando todas sus etapas;
- b)** Las cargas de residuos peligrosos, emisiones, efluentes y generación de otros residuos, así como los parámetros de control de proceso, y
- c)** Cuando se realice un aprovechamiento energético o de sustitución de materiales, se especificará, además, el balance de energía, el poder calorífico del residuo y el proceso al cual será incorporado.

De acuerdo a los supuestos antes señalados, el trámite completo que se realiza con SEMARNAT es el SEMARNAT-07-33C, como se describe en la tabla 12:

**Tabla 12.** Trámite para la autorización de co-procesamiento

Trámite	Sujetos Obligados	¿Tiene costo?	Requisitos	prevención de información	plazo de respuesta	vigencia de la autorización	prorrogable a
Autorización para el Reciclaje o Co-procesamiento.  SEMARNAT-07-033-C	Prestadores de Servicio	Sí	<p>1.- Formato de solicitud debidamente requisitado.</p> <p>2.- Comprobante de pago de derechos (un original)</p> <p>3.- Copia de identificación oficial del solicitante o del acta constitutiva de la persona moral cuyo objeto social ampare las actividades que pretende desarrollar. (original(es) 1 copia(s))</p> <p>4.-Documento jurídico que acredite al representante legal. (1 para cotejo y devolución original(es) 1 copia (s))</p> <p>5.-Copia de la autorización de uso de suelo (original(es) 1 copia(s))</p>	10 días hábiles	30 días hábiles	10 años	10 años

			<p>6.-Copia del plano del proyecto ejecutivo de la planta en conjunto, (original(es) 1 copia(s))</p> <p>7.-El diagrama de flujo del proceso, (1 original(es) copia(s))</p> <p>8.-Programa de capacitación del personal involucrado en el manejo de residuos peligrosos (1 original(es) copia(s))</p> <p>9.-Programa de prevención y atención de contingencias o emergencias ambientales y accidentes</p> <p>10.-Copia de la autorización en materia de impacto ambiental. (original(es) 1 copia(s))</p> <p>11.- Balance de materia y energía (Original).</p> <p>12.- Póliza de seguro (Original, 1 copia).</p> <p>13. Memoria fotográfica de las instalaciones (original(es)).</p>				
--	--	--	--	--	--	--	--



## **X. CONCLUSIONES**

Los resultados obtenidos en cuanto a la disponibilidad de ALG en Tuxtla Gutiérrez y el estado de Chiapas, indican que existe una considerable generación de este residuo para que la industria de calhidra pueda tomar las medidas correspondientes para recolectarlo o comprarlo con una empresa autorizada para la recolección de RP. Este servicio es de cobertura nacional y se ajusta a la necesidad de ALG que se quiera adquirir.

El ALG tiene un poder calorífico superior al del coque de petróleo y puede llegar a generar 5.1 GJ (los necesarios para los procesos de calcinación de la industria) por menos volumen de combustible. Con las adaptaciones correspondientes para su incorporación en los procesos productivos de la industria, se concluye que es una alternativa técnicamente viable para ser quemado como combustible alternativo.

Para la compra del combustible convencional, en 2019 se invertían aproximadamente \$172 USD/ton, el equivalente aproximado en ese entonces a \$3400 MXN/ton, mientras que un servicio de recolección autorizado por SEMARNAT llegó a recolectar ALG por un precio de \$2000 MXN/ton. Esta diferencia puede considerarse aceptable para concluir que es económicamente viable en términos de adquisición y reemplazo parcial o total del combustible.

Quemar ALG en los hornos de la industria calera a 1200°C garantiza la destrucción de los contaminantes que lo vuelven peligroso, sin embargo los metales pesados pueden persistir con la probabilidad de quedar absorbidos en la cal viva, resultado del proceso de calcinación de la materia prima, de esta manera no se emanarán a la atmósfera. De no ser así, se tendrá que realizar un pretratamiento para metales pesados, de manera que no represente un potencial peligro para el equilibrio

ecológico. Para obtener este dato en concreto, se necesita realizar un estudio de las emisiones generadas por un horno vertical que queme ALG a 1200C, sin embargo, actualmente en Chiapas no existe ninguna industria calera que queme ALG.

Ante lo descrito, se puede afirmar que el ALG es un RP que bajo las condiciones apropiadas, es factible de ser quemado como combustible alternativo en los procesos de fabricación de una industria de calhidra, toda vez que se manejen las adaptaciones correspondientes para su incorporación, puesto que el ALG puede sustituir al coque de petróleo al tener un poder calorífico superior por menos volumen de combustible. Aunque la autorización para co-procesar ALG conlleva una inversión económica, el costo de adquisición es considerablemente menor al del coque de petróleo, aunado a esto, disponiéndolo en sus procesos, siempre que se consideren las condiciones descritas anteriormente, convierte esta práctica en una alternativa viable para evitar la mala disposición de los ALG por medios que generen impactos ambientales negativos y expongan el equilibrio ecológico y la salud de la población.

## **XI. RECOMENDACIONES**

Con base en las conclusiones descritas en este proyecto, se recomienda elaborar un estudio de todos los generadores de RP que actualmente siguen generando ALG en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, esto con la finalidad de obtener un dato más puntual y actualizado de la disponibilidad de ALG.

Con la finalidad de llevar a cabo este proyecto en el terreno, se recomienda realizar un estudio que valore los costos de la autorización del trámite SEMARNAT-07-033-C, toda vez que se tiene que contemplar estudios cuyos costos pueden ser subjetivos de quién lo vaya a realizar.

En caso de ejecutar este proyecto, se recomienda realizar un estudio para caracterizar los contaminantes que se emanen a la atmósfera, esto con la finalidad de corroborar que no exista la persistencia de metales pesados después de quemar ALG.

Con base en lo descrito en las conclusiones, se recomienda elaborar un trabajo para evaluar los métodos de pretratamiento del ALG, esto para determinar cuál es el más factible para la industria calera en términos técnicos, económicos y ambientales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amesty, R., De Turrís, A., Rojas, D., Hurtado, A., Medrano, J., López, Y. (2015). Caracterización de aceites lubricantes automotor para reuso. *Serbiluz*, 5(1y2), 43-48.
- Andrade, C. (2015). Propuesta de un plan de Manejo Sustentable de los Aceites Asados Provenientes de los Talleres Automotrices y Lubricadores del Cantón Cañar. Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Andrade, F., López, J., Romero, E., Ortiz, M., Fabre, P. (2017). Aprovechamiento energético de aceites usados y su contribución a la economía circular mediante el coprocesamiento en hornos cementeros. *Ciencia UNEMI*, 10(24), 51-64.
- Arpa, O., Yumrutas, R., Demirbas, A. (2010). Production of diesel-like fuel from waste engine oil by pyrolytic distillation. *Applied Energy*, 87, 122-127.
- Audibert, F (2006). Waste Engine Oils: Rerefining and Energy Recovery, Amsterdam, the Netherlands: Elsevier.
- Beltrán, J. L. (2012). Propuesta para el manejo de fluidos contaminantes de un taller automotriz en el sector sur del Distrito Metropolitano de Quito. Tesis de grado. Escuela Politécnica del ejército, Latacunga.
- Capdevilla, R., Silva, R., Gotario, M. (2016). Valoración del impacto ambiental en una productora de aceites y grasas lubricantes. *Revista Cubana de Química*, 28(2), 736-750.
- Caruso, J., Zhang, K., Schroeck, N., McCoy, B., McElmurry, S. (2015). Petroleum Coke in the Urban Environment: A Review of Potential Health Effects. *Int J Environ Res Public Health*, 12(6), 6218-6231.

- Convenio de cooperación científica, tecnológica y financiera. (2006). Manual para el manejo integral de aceites lubricantes gastados. Bogotá, Colombia. Consultado en febrero de 2019. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias\\_qu%C3%ADmicas\\_y\\_residuos\\_peligrosos/manual\\_aceites\\_usados.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias_qu%C3%ADmicas_y_residuos_peligrosos/manual_aceites_usados.pdf)
- CYPE Ingenieros, S.A. (2019). Generador de precios México. Consultado en diciembre de 2019. Disponible en: [http://www.mexico.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/Gestion\\_de\\_residuos/Gestion\\_de\\_residuos\\_peligrosos/Transporte\\_de\\_residuos\\_peligrosos/GEB010\\_Transporte\\_de\\_bidon\\_de\\_residuos\\_pel.html](http://www.mexico.generadordeprecios.info/obra_nueva/Gestion_de_residuos/Gestion_de_residuos_peligrosos/Transporte_de_residuos_peligrosos/GEB010_Transporte_de_bidon_de_residuos_pel.html)
- Dalla, A., Khlebinskaia, O., Lodolo, A, Miertus, S. (2003). Compendium of Used Oil Regeneration Technologies. International Centre for Science and High Technology. Consultado en mayo de 2019. Disponible en: [https://www.academia.edu/39977002/Compendium\\_of\\_Used\\_Oil\\_Regeneration\\_Technologies](https://www.academia.edu/39977002/Compendium_of_Used_Oil_Regeneration_Technologies)
- Darren, J. (2015). USE OF PETROLEUM COKE AS AN ADDITIONAL FUEL IN THE LIME KILN. Consultado en noviembre de 2019. Disponible en: <http://www.matrixengineer.com/documents/WhitePaperMatrixPAPEREX2015India-UseofPCasanAdditionalFuelintheLimeKil.pdf>
- Delgado, E., Parra, J., Aguilar, L., Guevara, D., Novoa, J. (2007). Combustibles alternativos a partir de aceites usados con tratamientos de limpieza. *Avances Investigación en Ingeniería*, (6), 110-115.
- Delgado, E., Parra, J., Aperador, W. (2011). Diseño de una centrífuga para aceite usado vehicular. *Revista de la facultad de ingeniería*. 12(24), 66-73.

- Schwarzkopf, F. (1971). Una comparación de los modernos sistemas de calcinación de cal. *Rock Products*, 21(141), 68-71.
- Ferré, N., Schuhmacher, M., Llobet, J., Domingo, J. (2007). Diseño de un software para evaluar los riesgos de la exposición ambiental a través del agua, suelos y aire. Metales pesados y salud. Barcelona, España. Consultado en noviembre de 2019. Disponible en: <https://www.mapfre.com/ccm/content/documentos/fundacion/prev-ma/revista-seguridad/n108-programa-hra-metales-pesados.pdf>
- Fong, W., Quiñonez, E., Tejada, C. (2017). Physical-chemical characterization of spent engine oils for its recycling. *Prospectiva* 15(2), 135-144.
- Gagnon A., Backhouse N., Darmstadt H., Ryan E., Dyer L., Dixon D.G. (2016). Impurity Removal from Petroleum Coke. In: Sadler B.A. (eds) Light Metals 2013. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham.
- González, J. (2014). Propuesta de un plan de manejo de aceites lubricantes usados de automóviles para el estado de Carabobo. Tesis de Postgrado. Carabobo, Venezuela.
- Grupo Consultivo de Expertos (GCE). (2012). Manual del sector de la energía. Consultado en enero de 2020 en: <https://unfccc.int/sites/default/files/7-bis-handbook-on-energy-sector-fuel-combustion.pdf>
- Guerrero, C. (2001). Rocas Calizas, ciclo de carbonato, propiedades, aplicaciones, distribución y perspectivas en la Mexteca Oaxaqueña. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 5(14), 3-14.
- GULF OIL ARGENTINA S.A. (2016). Manual técnico, Lubricantes. Buenos Aires. Consultado en abril de 2019. Disponible en: [http://remex.com.ar/descargas\\_web/1-1%20Gulf%20-%20Manual%20Tecnico%20de%20Lubricantes.pdf](http://remex.com.ar/descargas_web/1-1%20Gulf%20-%20Manual%20Tecnico%20de%20Lubricantes.pdf)

- Hooda, P., Alloway, B. (1996). The effect of liming on heavy metal concentrations in wheat, carrots and spinach grown on previously sludge-applied soils. *Journal of Agricultural Science*. 127(3), 289-294.
- Ibrahim, H. (2016). Determination of the calorific value of syrian delayed petroleum coke. *MedCrave*, 1(3), 63-67.
- Ifeanyichukwu, H. (2011). The Potential of *Chromolaena Odorata* (L) to Decontaminate Used Engine Oil Impacted Soil Under Greenhouse Conditions. *International Journal of Phytoremediation*, 13, 627-641.
- Kopytynski, W. (2011). Informe técnico para aceites usados y sus usos. Consultado en febrero de 2019. Disponible en: <https://estrucplan.com.ar/articulos/informe-tecnico-sobre-aceites-usados-y-sus-usos/>
- LGPGIR: Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. México: Diario Oficial de la Federación, 08 de octubre de 2003.
- López, J. (2016). Aprovechamiento energético de aceites usados y su contribución a la sustentabilidad ambiental mediante el coprocesamiento en hornos cementeros. Tesis de Postgrado. Riobamba, Ecuador.
- Macas, L., Mancheno, M., Jaramillo, D. Urgilés, D. (2011). Optimización de lubricantes de base mineral de motores a inyección de gasolina, para la reducción de la contaminación y costos de mantenimientos, *Ingenius*. 5, 73-80.
- Manzanares Jiménez, L., Ibarra-Ceceña, M. (2012). Diagnóstico del uso y manejo de los residuos de aceite automotriz en el municipio del fuerte, Sinaloa. *Ra Ximhai*, 8(2), 129-137.
- Martín, J. (2008). La gestión de los aceites usados. Escuela de Organización Industrial. Madrid, España.

- Martínez, J. (2005). Guía para la gestión integral de residuos peligrosos. Fichas temáticas. Montevideo, Uruguay. Consultado en marzo, [http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/gestion\\_r02-fichas\\_tematicas.pdf](http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/gestion_r02-fichas_tematicas.pdf)
- Nasim, N., Pervez, S., Babu, R., Lotia, N. (2014). Recycling waste automotive engine oil as alternative fuel for diesel engine: A Review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 46-50.
- Nelson, T. (2001). Critical review of existing studies and life cycle analysis on the regeneration and incineration of waste oils. Consultado en abril de 2019. Disponible en : [http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/oil/waste\\_oil.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/oil/waste_oil.pdf)
- NOM-052-SEMARNAT-2005. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. México: Diario Oficial de la Federación, 23 de junio de 2006.
- ONCAE, (2016). Estudio de Mercado Lubricantes Para Vehículos. HONDURAS: Oficina Normativa de Contratación y Adquisiciones del Estado.
- Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M., Villar, S. (2007). La contaminación de los suelos. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Universidad de Alcalá. España. 12-14. Consultado en abril de 2019: [https://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6\\_tecnicas\\_recuperacion\\_suelos\\_contaminados.pdf](https://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf)
- Palma, V. (2009). Historia de la producción de cal en el norte de la cuenca de México. *CIENCIA ergo sum*. 16(3), 227-234.
- Palomo, J. (2015). Manipulación y ensamblaje de tuberías. Madrid, España: Ediciones Paraninfo S.A.



- Peñafiel, S. (2017). Caracterización del manejo de aceites de desecho de automóviles e hidráulicos de origen industrial en la ciudad de Cuenca. Tesis de grado. Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Ramesh, V., Narayana, L. (2016). Waste lubricating oil as an alternative fuel blended with diesel. *International Journal of Advanced Scientific Research*. 1(1), 01-04.
- Rocha, G., Beltrán, U., Ramírez, L. (2011). Estudio paramétrico de la gasificación del coque de petróleo mexicano: efecto de la alimentación de coque de petróleo sobre las características energéticas del gas sintético. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 12(3), 291-300.
- Santos, Aldo R, & Silva, Rogério J. (2008). Análisis del Consumo de Coque de Petróleo en Algunos Sectores Industriales. *Información tecnológica*, 19(2), 93-101.
- Secretaría de Economía. (2018). Perfil de mercado de la caliza. Consultado en marzo de 2022. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419263/Perfil\\_Caliza\\_2018\\_\\_T\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419263/Perfil_Caliza_2018__T_.pdf)
- Secretaría del Convenio de Estocolmo. (2008). Directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación provisional sobre mejores prácticas ambientales. Consultado en marzo de 2019. Disponible en: [http://chm.pops.int/Portals/0/Repository/batbep\\_guideline08/UNEP-POPS-BATBEP-GUIDE-08-2.Spanish.PDF](http://chm.pops.int/Portals/0/Repository/batbep_guideline08/UNEP-POPS-BATBEP-GUIDE-08-2.Spanish.PDF)
- SEMARNAT, (2019). Inventario Nacional de Residuos Peligrosos. Consultado en abril de 2019. Disponible en: [https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/residuos/padron/generacion\\_rp\\_por\\_tipo\\_y\\_corriente.csv](https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/residuos/padron/generacion_rp_por_tipo_y_corriente.csv)

- Shabanzade, H., Salem, A. & Salem, S. (2019). Efficient removal of contaminants from waste lubricant oil by nano-porous bentonite produced via microwave-assisted rapid activation: process identifications and optimization. *Environ Sci Pollut Res* 26, 23257–23267.
- Sierra, J. (2010). Cómo descifrar la nomenclatura de los aceites lubricantes. *Vida rural*, (303), 40-43.
- SIRESA, (2005). Construcción y Operación de un Almacén Temporal de Residuos en el municipio de Umán, Yucatán. Consultado en febrero de 2022. Disponible en: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/yuc/estudios/2007/31YU2007ID010.pdf>
- Subsecretaría de Minería. (2014). CALIZA. México. Consultado en abril de 2019. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287793/Perfil Caliza 2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287793/Perfil_Caliza_2017.pdf)
- TOTAL, (2016). Diferencias entre el aceite sintético y el mineral. Consultado en abril de 2019: <https://blog.total.com.mx/diferencias-entre-el-aceite-sintetico-y-el-mineral/>
- U.S. EPA. UNDERSTANDING BIOREMEDIATION: A GUIDEBOOK FOR CITIZENS. EPA/540/2-91/002, 1991.
- UCEM CEM, Planta Chimborazo. (2015). Proceso productivo de clinkerización.