

1-1-2006

Determinación de la viabilidad técnico-económica de la utilización de aceite usado como fuente primaria de energía en plantas de generación eléctrica

Dairo Martínez Triana
Universidad de La Salle, Bogotá

Ciro Antonio Rodríguez
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica

Citación recomendada

Martínez Triana, D., & Rodríguez, C. A. (2006). Determinación de la viabilidad técnico-económica de la utilización de aceite usado como fuente primaria de energía en plantas de generación eléctrica. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/535

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICO - ECONÓMICA DE LA
UTILIZACIÓN DE ACEITE USADO COMO FUENTE PRIMARIA DE ENERGÍA EN
PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**

**DAIRO MARTINEZ TRIANA
CIRO ANTONIO RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA**

BOGOTÁ

2006

**DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICO - ECONÓMICA DE
LAUTILIZACIÓN DE ACEITE USADO COMO FUENTE PRIMARIA DE ENERGÍA
EN PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**

**DAIRO MARTINEZ TRIANA
CIRO ANTONIO RODRÍGUEZ**

Tesis para optar al título de

Ingeniero Electricista

Director

LEONARDO CALLE

Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA

BOGOTÁ

2006

**BOGOTÁ 24 DE NOVIEMBRE DE
2006**

Nota de Aceptación:

Director

Jurado

Jurado

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Gustavo Arciniegas. Ingeniero Electrónico. Por su motivación y colaboración para la realización de este trabajo.

Leonardo Calle. Ingeniero Químico. Director de este proyecto y asesor de la investigación, por su valiosa orientación.

La Unidad de Planeación Minero Energética "UPME" por facilitarnos información sobre los aceites usados y orientarnos en algunos apartes de la investigación.

La Biblioteca de la Universidad de la Salle por facilitarnos la información pertinente al tema de investigación de este proyecto.

A nuestras Esposas y nuestros Hijos por su amor, apoyo y ayuda incondicional en cada momento de nuestra vida. Extiendo también estos agradecimientos a nuestros familiares, compañeros de estudio y de trabajo, a nuestros profesores y a cada uno de los que colaboraron en la realización de este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	3
1 MARCO TEÓRICO	4
1.1 INTRODUCCIÓN	4
1.2 ACEITES USADOS	4
1.3 PROCESOS DE RE-REFINO/REGENERACIÓN DE ACEITES MINERALES USADOS.....	6
1.3.1 Procesos de tratamiento en ácido / tierras.....	7
1.3.1.1 Tecnología Meinken	8
1.3.2 Procesos de destilación al vacío e hidrogenación	8
1.3.2.1 Tecnología KTI	9
1.3.2.2 Tecnología Mohawk.....	11
1.3.2.3 Tecnología Berc o Niper	12
1.3.2.4 Tecnología Prop.....	14
1.3.2.5 Tecnología Safetv Kleen	16
1.3.2.6 Tecnología IFP / Tecnología Snamprogetti.....	18
1.3.2.7 Tecnología UOP DCH.....	20
1.3.3 Procesos de destilación al vacío y tratamiento en tierras	21
1.3.3.1 Tecnología Viscolube	21
1.3.3.2 Tecnología RTI	23
1.3.3.2 Tecnología Interline	23
1.3.3.4 Tecnología Rose – Kellog	24

1.3.4 Otras tecnologías	25
1.3.4.1 Tecnología entra	25
1.3.4.2 Tecnología Recyclon	26
1.3.4.3 Tecnología Krupp Koppers supercrítico	27
1.3.4.4 Tecnología Vaxon.....	27
1.3.4.5 Tecnología CEA.....	28
1.3.5 Resumen de las tecnologías mencionadas.....	28
1.4 UTILIACIÓN DEL RESIDUO COMO COMBUSTIBLE	29
1.4.1 Concentración de contaminantes vs límites máximos permisibles	29
1.4.2 Distribución de contaminantes durante el proceso de combustión	33
1.4.3 Impacto de los contaminantes normalmente presentes en los aceites usados, en la salud humana	35
1.4.3.1 Cadmio (Cd).....	35
1.4.3.2 Plomo (Pb)	35
1.4.3.3 Mercurio (Hg)	36
1.4.3.4 Cromo (Cr)	36
1.4.3.5 Bario (Ba).....	37
1.4.3.6 Aluminio (Al).....	37
1.4.3.7 Zinc (Zn).....	38
1.4.3.8 Arsénico (As)	39
1.4.3.9 Azufre (S).....	39
1.4.3.10 Calcio (Ca)	40
1.4.3.11 Magnesio (Mg)	41

1.4.3.12 Fósforo (P)	41
1.4.3.13 Cobre (Cu)	42
1.4.3.14 Hierro (Fe).....	42
1.4.3.15 Níquel (Ni).....	43
1.4.3.16 Cloro (Cl).....	44
1.4.3.17 Silicio (Si).....	44
1.4.3.18 Hidrocarburos livianos (metano-propano-butano).....	45
1.4.3.19 Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's)	45
1.4.4 Dioxinas y furanos	46
1.5 Combustión.....	47
1.5.1 Reacciones de combustión.....	48
1.5.2 Eficacia de la combustión	51
1.5.3 El azufre en el proceso de la reducción catalítica (SCR)	52
1.5.3.1 Procesos SCR convencionales en la aplicación	52
1.6 Combustibles	54
1.6.1 Poder calorífico.....	55
1.6.2 Clasificación y especificaciones de los combustibles industriales	56
1.6.2.1 Combustibles sólidos	56
1.6.2.1.1 Carbón lignítico	57
1.6.2.1.2 Carbón sub/bituminoso	57
1.6.2.1.3 Carbón semibituminosos.....	58
1.6.2.1.4 Carbón bituminoso	58
1.6.2.1.5 Antracita.....	58

1.6.2.1.6 Residuos sólidos urbanos (RSU)	59
1.6.2.1.7 Productos de combustión incompleta (PCI) de los residuos sólidos urbanos (RSU)	60
1.6.2.1.8 Características de algunos combustibles alternativos.....	62
1.6.2.2 Combustibles líquidos	63
1.6.2.3 Combustibles líquidos artificiales	65
1.6.2.4 Combustibles gaseosos	65
1.6.2.4.1 Metano	67
1.6.2.4.2 Etano	70
1.6.2.4.3 Propano	72
1.6.2.4.4 Butano.....	74
1.6.2.5 Otros productos combustibles.....	75
1.6.3 API y gravedad específica o densidad	76
1.6.4 Viscosidad.....	76
1.6.5 Contenido de calor o capacidad calorífica	76
2 HISTORIA Y SITUACIÓN ACTUAL DEL PROBLEMA	78
2.1 INTRODUCCIÓN	78
2.2 EXPERIENCIA INTERNACIONAL.....	78
2.2.1 Unión europea	78
2.2.1.1 España.....	80
2.2.1.2 Regeneración.....	81
2.2.2 Uruguay	83

2.3 Experiencia en Colombia	85
3 EVALUACIÓN TÉCNICA	92
3.1 INTRODUCCIÓN	92
3.2 ACEITE USADO COMO COMBUSTIBLE	93
3.2.1 Poder calorífico	93
3.2.2 Acondicionamiento del residuo	95
3.2.2.1 Procesos de minimización en origen/reprocesado de aceites minerales usados	95
3.2.2.2 Proceso diseñado por la empresa Lupien Rosenberg Et Associes Colombia Ltda. Y publicado por la UPME	97
3.2.2.3 Sistemas de valorización energética	100
3.2.2.3.1 Aplicación directa como combustible	100
3.2.2.3.2 Aplicación como combustible después de un leve tratamiento	101
3.2.2.3.3 Aplicación como combustible después de un tratamiento severo	102
3.2.2.4 Lodos aceitosos	102
3.2.3 Disponibilidad del residuo	102
3.3 Equipos de combustión	103
3.3.1 Motores diesel	103
3.3.2 Calderas	104
3.3.3 Hornos	105
4 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA	106
4.1 INTRODUCCIÓN	106
4.2 TECNOLOGÍA DE GENERACIÓN	106

4.3 CICLO TERMODINÁMICO	107
4.3.1 Ciclo de Rankine	107
4.3.2 Rendimiento del ciclo Rankine	110
4.3.3 Divergencia entre los ciclos ideales y reales.....	111
4.4 EFICIENCIA DE LA PLANTA.....	112
4.4.1 EFICIENCIA DE LA CALDERA.....	112
4.4.2 Eficiencia turbina – generador	113
4.4.3 Eficiencia de la central termoeléctrica.....	118
4.5 DIMENSIONAMIENTO	120
4.5.1 Energía contenida en el combustible	120
4.5.2 Capacidad de generación de energía eléctrica a partir del combustible.....	122
4.5.3 Características de los equipos de planta	123
4.5.3.1 Características del generador	123
4.5.3.2 Características del transformador principal.....	123
4.5.3.3 Características del transformador de servicios auxiliares	124
4.5.4 Energía disponible para la venta.....	124
5 EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	126
5.1 INTRUDUCCIÓN	126
5.1.1 Costo de oportunidad del dinero	126
5.1.2 Tasa de interés de oportunidad (TIO)	127
5.1.3 Flujo de caja.....	128
5.1.4 Valor presente neto (VPN)	128
5.1.5 Tasa interna de rentabilidad o de retorno	129

5.2 COSTO DE RECUPERACIÓN Y REGENERACIÓN DE LOS ACEITES USADOS.....	130
5.3 INVERSIÓN	132
5.3.1 Costo de operacional y mantenimiento.....	134
5.4 INGRESOS.....	135
5.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO.....	135
6 CONCLUSIONES	140
7 RECOMENDACIONES.....	142
BIBLIOGRAFIA.....	143

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resumen de las Tecnologías	29
Tabla 2. Características de los aceites usados en Colombia	30
Tabla 3. Contaminantes generalmente presentes en los aceites usados y su concentración.....	31
Tabla 4. Cantidades máximas de compuestos contaminantes permisibles en un combustible.....	32
Tabla 5. Niveles máximos de contaminación permisibles en aceites usados.....	33
Tabla 6. Distribución porcentual de contaminantes en las corrientes de salida	34
Tabla 7. Efectos de dioxinas y furanos sobre el organismo	47
Tabla 8. Reacciones químicas típicas de la combustión	49
Tabla 9. Parámetros (valores medios) mas representativos para una serie de combustibles residuales.....	63
Tabla 10. Parámetros (valores medios) mas representativos para una serie de combustibles residuales.....	63
Tabla 11. Temperatura para punto de inflamación	66
Tabla 12. Características Físico – Químicas del Metano	69
Tabla 13. Propiedades y características del etano	72
Tabla 14. Características Físico – Químicas del Propano.....	73
Tabla 15. Características Físico – Químicas del Butano	74
Tabla 16. Residuos usados en procesos de combustión	94
Tabla 17. Combustibles fósiles y su poder calorífico.....	95
Tabla 18. Contenido de contaminantes antes y después del proceso de acondicionamiento	98
Tabla 19. Viscosidad (Saybolt Furol SSF) Del Fuel Oil, Combustóleo, ACPM.....	99
Tabla 20. Opciones de mezclas energéticas posibles.....	99
Tabla 21. Eficiencia de los equipos de la central térmica	119
Tabla 22. Indicadores financieros planta de tratamiento aceites usados	130
Tabla 23. Inversión en la obra civil	132

Tabla 24. Inversión equipo mecánico	133
Tabla 25. Inversión equipo eléctrico	133
Tabla 26. Inversiones directas	134
Tabla 27. Inversión Total	134
Tabla 28. Evaluación Económica periodo 0-5	137
Tabla 29. Evaluación Económica periodo 6-13	138
Tabla 30. Evaluación Económica periodo 14-20	139

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema básico de las tecnologías de tratamiento ácido/tierra.....	7
Figura 2. Diagrama de los procesos de destilación al vacío y hidrogenación	9
Figura 3. Diagrama de la tecnología KT	11
Figura 4. Diagrama de la tecnología Berc o Niper	14
Figura 5. Diagrama de la tecnología Prop.....	16
Figura 6. Diagrama de la tecnología Safety Kleen	17
Figura 7. Diagrama de la tecnología IFP.....	19
Figura 8. Diagrama de la tecnología Snamprogetti.....	19
Figura 9. Diagrama de la tecnología UOP DCH.....	21
Figura 10. Diagrama de la tecnología Viscolube.....	22
Figura 11. Distribución de dioxinas y furanos durante el proceso de combustión .	47
Figura 12. Eficiencia Vs exceso de aire	51
Figura 13. Variación de los porcentajes de carbono, oxígeno e hidrógeno durante la formación de los distintos carbones naturales	57
Figura 14. Muestra el PCI de los principales componentes del RSU.....	61
Figura 15. Muestra los residuos como combustibles en $P_c(x1000kcal/Kg)$	62
Figura 16. Destino de los aceites usados en España	81
Figura 17. Diagrama de proceso para acondicionamiento de los aceites usados	97
Figura 18. Esquema del equipo de un ciclo Ranking	108
Figura 19. Diagrama P - V del ciclo Ranking	109
Figura 20. Diagrama T - S del ciclo Ranking.....	110
Figura 21. Turbinas de media y baja presión y Diagrama de T - S del ciclo	111
Figura 22. Representación gráfica flujo de caja	126
Figura 23. VPN Vs. Tasa de interés o interés	129
Figura 24. Gráfica flujo de caja	136

GLOSARIO

CATOR (Catalana de Tractament d'Oils Residuals s.a.): Es una empresa comprometida en la mejora del medio ambiente, en la gestión integral de los aceites usados, tanto de automoción como industriales

CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe): Organización europea de empresas petrolíferas para la protección del medio ambiente y la salud.

DIOXINA: Miembro de la familia de los compuestos orgánicos conocido como (PCDD) Poli Cloro Divenzo Dioxina, posee triple anillo de benceno que están interconectados por un par de átomos de oxígeno, sus isótopos se encuentran entre las sustancias más tóxicas.

EPA (Environmental Protection Agency): Agencia de protección ambiental.

FURANOS: Miembro de la familia de los compuestos orgánicos conocidos como (PCDF) Poli Cloro Divenzo Furano, posee doble anillo de benceno que están interconectados por un átomo de oxígeno, sus isótopos se encuentran entre las sustancias más tóxicas.

LAHCORP: Latinamerican Hydrocarbon Corporation S. A.

PAHs: Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos.

PCB: Bifenilo Policlorado.

PCI: Producción de Combustión Incompleta.

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

SCR: Reducción Catalítica Selectiva.

SSF: Segundo Saybolt Furol

SSU: Segundo Saybolt Universal

INTRODUCCIÓN

En Colombia la cantidad de aceite usado que se genera como resultado de la reposición por aceite nuevo en la industria y el parque automotor, ronda los 50 millones de galones anuales, de los cuales se ha calculado un potencial de recuperación cercano a los 17.7 millones de galones, y en la ciudad de Bogotá se generan aproximadamente 4'500.000 galones de aceite lubricante usado al año, siendo un volumen significativo e interesante, lo que incentiva a utilizar métodos de recuperación y diseño de sistemas que permitan un adecuado manejo del aceite usado, buscando la minimización de su impacto ambiental, y aprovechando sus características como combustible.

Haciéndonos partícipes del grupo de investigadores interesados en encontrar una solución adecuada al problema generado por este recurso, nos propusimos la tarea de ahondar en las investigaciones necesarias para identificar condiciones que permitan un óptimo aprovechamiento como fuente primaria de energía en plantas de generación eléctrica, permitiendo particularmente aprovechar de manera mas eficiente el aceite usado que se genera en Bogotá, contribuyendo de esta forma en la reducción del impacto ambiental negativo generado por la utilización no controlada de este residuo peligroso en procesos de combustión industrial.

En consecución del presente estudio consideramos que aceite usado es todo aceite proveniente de fuentes industriales o no industriales, que fue adquirido para propósitos de lubricación u otros propósitos y que se ha vuelto inadecuado para el uso previsto debido a la presencia de impurezas o a la pérdida de sus propiedades originales. El aceite usado no incluye aceites derivados de grasas animales o vegetales, ni residuos provenientes de la refinación de petróleo, ni petróleos crudos o combustibles recuperados de derrames.

En términos generales, en el presente estudio no se trata al aceite usado exclusivamente como un residuo peligroso. Puede ser o no designado como tal dependiendo del tipo y la calidad de las impurezas que contenga.

De modo que, los beneficios serán derivados no simplemente en términos técnico-económicos y de retorno a la inversión o beneficios por liberación de combustibles para exportación, sino también en términos de beneficios ambientales y a la salud que no son fácilmente calculables, generados por una significativa reducción de contaminantes metálicos arrojados a la atmósfera, como resultado del valor agregado aportado al residuo en procesos de tratamiento tales como centrifugación, decantación, filtración o re-refinación.

La ejecución de planes y programas encaminados a lograr un mejor manejo, recolección, transporte y aprovechamiento de este residuo se traducirá en mayores niveles de cultura ciudadana permitiendo una mejor utilización del mismo y una eventual disminución en los volúmenes de aceite usado que se desvían hacia la falsificación y adulteración de lubricantes automotores, actividad que genera importantes pérdidas a las empresas que legalmente formulan y distribuyen estos productos.

OBJETIVOS

Generales

- Determinar la factibilidad técnico - económica de la utilización de los aceites usados como fuente primaria de energía en una planta térmica a vapor con ciclo cerrado, o motor alternativo; para generar energía eléctrica distribuida en la ciudad de Bogotá.

Específicos

- Identificar las características tanto físicas como de poder calorífico de los aceites usados, y su compatibilidad como combustible con las diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica.
- Identificar estadísticamente la cantidad de aceite usado disponible en la ciudad de Bogotá.
- Determinar que tecnología es más adecuada si la térmica a vapor de ciclo cerrado o la de combustión interna en los motores alternativos para generar energía eléctrica utilizando como fuente primaria de energía, los aceites usados, de acuerdo con los resultados de la comparación entre los gastos y costos que se generan al utilizar un combustible tradicional y los generados al utilizar los aceites usados como combustible en el proceso de generación de energía eléctrica.

1. MARCO TEORICO

1.1 INTRODUCCIÓN.

Para determinar la viabilidad técnica de la utilización de los aceites usados como fuente energética en el proceso de combustión inherente a una planta generadora, es necesario estudiar sus características físicas y químicas, con el fin de identificar las dificultades que pueden existir en este proceso, y las posibles soluciones referentes tanto al residuo como a los equipos que intervienen en la combustión.

1.2 ACEITES USADOS.

Los aceites lubricantes son elaborados en Colombia en un 90% con bases Nafténicas y/o Parafinicas, las cuales son producidas por Ecopetrol (40%) o importadas directamente por los productores de Venezuela, Estados Unidos y/o Europa (60%). Estas bases lubricantes mezcladas con aditivos en una proporción aproximada de 10%, da como resultado el aceite lubricante.

Una vez aprovechado como agente lubricante en la maquinaria industrial o el parque automotor, los aceites son drenados de estos sistemas y almacenados para su aprovechamiento y/o disposición final. Los usos más comunes dados al aceite lubricante usado en Colombia son: como combustible para calderas, hornos ó calentadores técnicamente inadecuados, en mezcla con combustibles tradicionales o como único combustible, produciendo toxinas nocivas tanto para el ser humano como para el medio ambiente, La incineración inadecuada de 5 litros de aceite provoca la contaminación del volumen de aire necesario para una persona durante tres años, producido por el vertido de elementos como cloro, fósforo, azufre y plomo, procedentes de aditivos, gasolinas, etc¹. Este aspecto será ampliado posteriormente en este capítulo.

¹ <http://www.panoramaenergetico.com/default.htm>

También se usa como impermeabilizante e inmunizante para maderas, como agente para el control de polvo en carreteras destapadas, como aceite desmoldante, para temple de metales, o simplemente es vertido al alcantarillado de la ciudad provocando el taponamiento de los sistemas de aguas lluvias o aguas negras. En general el resultado es la contaminación de 1000 galones de agua por cada galón de aceite² que logra circular por el alcantarillado hasta llegar a un afluente. Estos aceites originan, debido a su viscosidad, una fina película que genera una separación física entre la atmósfera y el agua, impidiendo que el oxígeno de la primera se disuelva en la segunda, distorsionando el equilibrio biológico de las aguas durante un intervalo largo de tiempo; en el mar un compuesto hidrocarbonado puede perdurar 10 ó 15 años³. Además el aceite usado puede ser recogido por falsificadores que después de agregar colorantes lo venden como aceite lubricante nuevo, perjudicando tanto a los usuarios como a las empresas productoras, si es enterrado puede contaminar tanto el suelo como las aguas subterráneas, en este caso el residuo también crea una película, eliminando la propia fertilidad de las tierras al impedir el normal desarrollo de la actividad biológica, la transferencia entre el suelo, el agua y la atmósfera y transformar la química del suelo⁴.

Se estima que en Colombia el mercado de aceite lubricante fluctúa alrededor de 50 millones de galones anuales, de los cuales se ha calculado un potencial de recuperación cercano a los 17.7 millones de galones⁵. En Bogotá se consumen 15'000.000 de galones anuales de aceites lubricantes de los cuales aproximadamente el 30% pueden ser recuperados⁶, ésta cantidad obviamente requerirá una adecuada gestión. El mayor volumen es generado por el parque automotor seguido por las diferentes aplicaciones industriales. Este tipo de residuos de material inflamable, contiene un excelente poder calorífico y puede constituirse en sustituto parcial de otras fuentes de combustible tales como el fuel

² Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001.

³ <http://www.panoramaenergetico.com/default.htm>

⁴ <http://www.panoramaenergetico.com/default.htm>

⁵ Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001.

⁶ Manual de normas y procedimientos para la gestión de aceites usados, DAMA, Bogotá, Agosto de 2003.

pesado y el carbón, a un menor costo. Por cada millón de galones de aceite usado que se incorpore al mercado nacional de combustibles, se liberan productos exportables por ingresos equivalentes a US\$ 500.000, valorados como combustóleo a un precio de US\$ 21 por barril⁷.

1.3 PROCESOS DE RE-REFINO/REGENERACIÓN DE ACEITES MINERALES USADOS

El aumento de la variedad de aceites usados en los últimos años, ha comportado que los procesos tradicionales de tratamiento de aceites, basados en tecnologías ácido/tierras no consiguieran aceites de base de las calidades finales deseadas. Además, la preocupación por cuestiones medioambientales dificulta todavía más la obtención de procesos adecuados. Las tecnologías anteriores basadas en procesos con ácido y tierras actualmente están en desuso por cuestiones medioambientales y económicas. Económicamente, se trata de instalaciones con un alto costo de inversión y ambientalmente tienen el problema del tratamiento de las tierras ácidas generadas en el proceso. Para solucionar estos problemas se ha recurrido a la introducción de tecnologías que incorporan procesos de destilación al vacío e hidrogenación.

Los procesos basados en la destilación al vacío e hidrogenación tienen como características comunes los siguientes procedimientos:

- Destilación de aceites usados previamente deshidratados.
- Hidrogenación de los productos destilados⁸.

A continuación se describen los distintos procesos existentes, agrupados según sean las tecnologías básicas a utilizar:

- Tecnologías basadas en tratamiento ácido / tierras.
- Tecnologías basadas en destilación al vacío y tratamiento en tierras.

⁷ Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001.

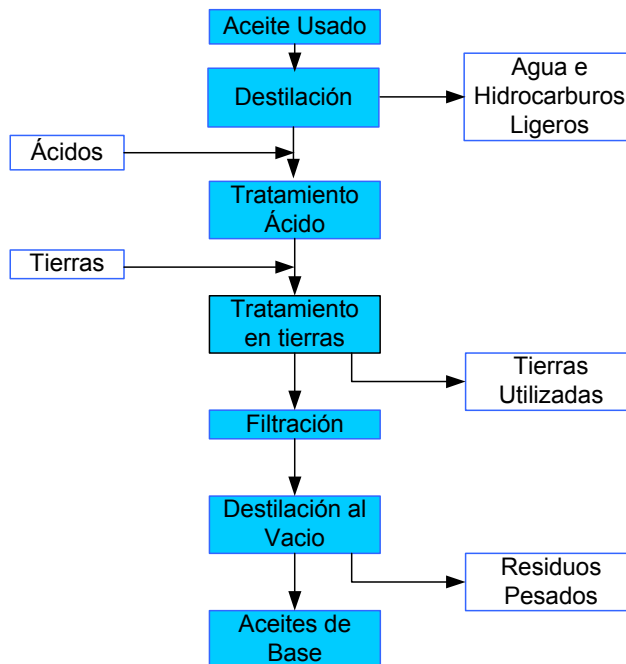
* Empresa que ya realiza el proceso de acondicionamiento a los aceites usados

⁸ Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados, Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL), Barcelona (España), publicación 2001

- Tecnologías basadas en destilación al vacío e hidrogenación.

1.3.1 Procesos de tratamiento en ácido / tierras. Se trata de procesos obsoletos que actualmente están en desuso. En esencia, estos procesos siguen el siguiente diagrama.

Figura 1. Esquema básico de las tecnologías de tratamiento ácido/tierra



Fuente: Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Febrero 2001

Las tecnologías ácido/tierras se basan en el tratamiento del substrato con ácido sulfúrico para la eliminación de los elementos contaminantes y el posterior tratamiento con tierras para la neutralización del producto resultante. De esta manera, el tratamiento con tierras permite conseguir el color y olor deseados. Presenta el problema de la posterior utilización y aplicación del residuo ácido

generado, que en muchas ocasiones se debe considerar como tóxico y peligroso, con los consiguientes problemas en cuanto a su disposición en vertedero.

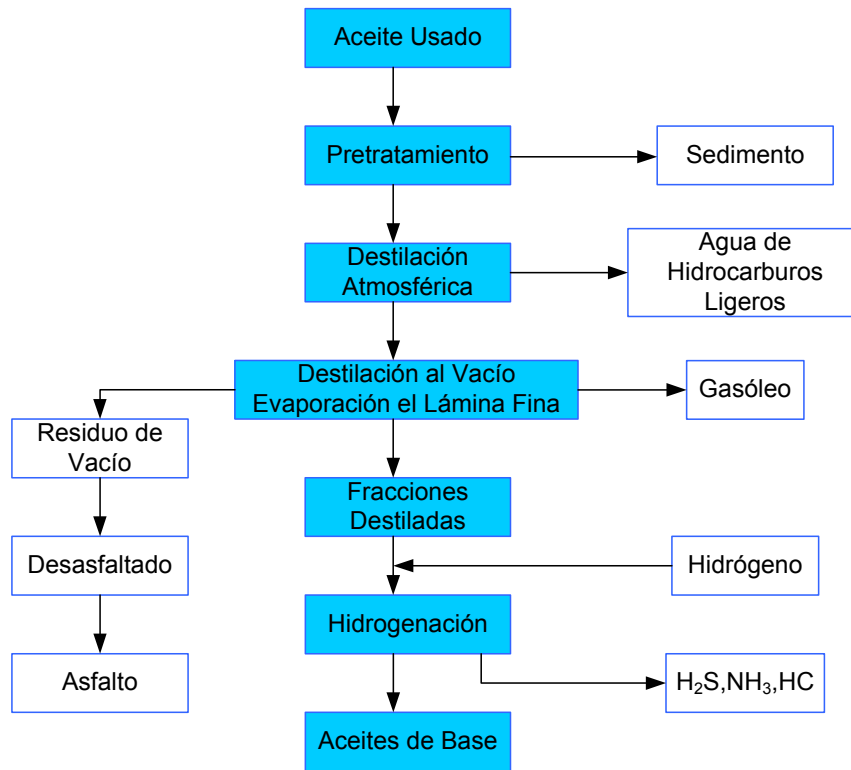
1.3.1.1 Tecnología Meinken. Se trata de una tecnología que ya no se utiliza por cuestiones económicas y por la problemática que generaba con el tratamiento de las tierras ácidas. También conlleva problemas de corrosión interna y problemas de vertido.

Las ventajas principales de este proceso son el bajo coste de inversión y mantenimiento, la posibilidad de tratar aceites usados de calidad muy baja, y la flexibilidad y facilidad de manipulación del mismo.

1.3.2 Procesos de destilación al vacío e hidrogenación. Este tipo de procesos son los que mayoritariamente se utilizan en Italia, tratando con estas tecnologías el 93% del aceite recogido, lo que representa 175.700 Tm de aceite al año. Los productos resultantes son en un 60% aceites de base y en un 8% aceites ligeros. Los residuos producidos durante el proceso de refinado, que contienen aditivos, asfáltenos, compuestos resultantes de oxidaciones y polimerizaciones, metales y otras impurezas, se destruyen mediante procesos de combustión en plantas especiales. Actualmente, Italia se encuentra en primera posición a nivel europeo en cuanto a la cantidad de aceite re-refinado respecto al total de aceite producido.

En el cuadro siguiente se muestra el esquema general de las tecnologías basadas en la destilación al vacío e hidrogenación.

Figura 2. Diagrama de los procesos de destilación al vacío y hidrogenación



Fuente: Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Febrero 2001

1.3.2.1 Tecnología KTI. El proceso KTI (Kinetics Technology International), también conocido como KTI Relub Technology, combina la destilación al vacío y el tratamiento de hidrogenación para eliminar la mayoría de elementos contaminantes del aceite usado.

Los pasos básicos del proceso son los siguientes:

Destilación atmosférica: comporta la eliminación de agua e hidrocarburos ligeros.

Destilación al vacío: el producto resultante se encuentra dentro del rango de los aceites lubricantes. La temperatura de trabajo no ha de ser superior a 250 °C.

Hidrogenación de los productos destilados al vacío: los aceites destilados en la fase anterior se someten a un tratamiento de hidrogenación para eliminar los compuestos

sulfurosos, nitrogenados y oxígeno. Esta fase se aprovecha, también, para mejorar el color y olor del aceite.

Fraccionamiento: el aceite hidrogenado se separa en distintas fracciones de aceites de base según las especificaciones y requerimientos del producto deseado.

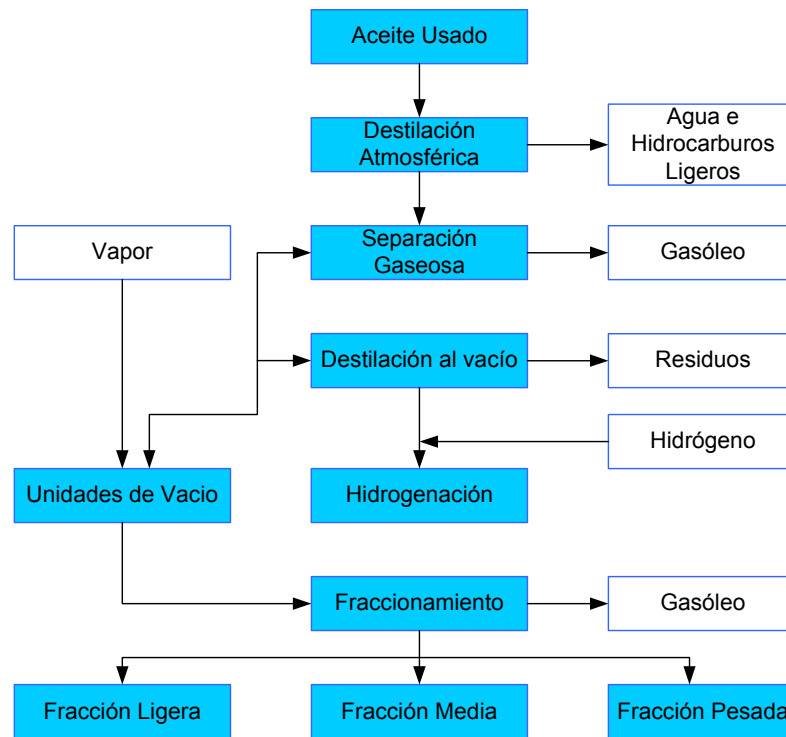
Esta tecnología acepta PCB's y otros materiales peligrosos, obteniéndose un rendimiento del 82% de aceites de base de alta calidad (respecto el aceite usado seco tratado).

El residuo producido en la fase de destilación al vacío contiene aditivos, derivados asfálticos, productos oxidados y otras impurezas que tienen valor comercial.

La primera re-refinería basada en esta tecnología se puso en funcionamiento en Grecia al 1992. También hay plantas de este tipo en Túnez y California.

El diagrama del proceso se detalla a continuación.

Figura 3. Diagrama de la tecnología KTI



Fuente: Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Febrero 2001

1.3.2.2 Tecnología Mohawk. Esta tecnología la desarrollo la compañía Mohawk Oil en Canadá y se basa en la tecnología KTI anteriormente expuesta.

La diferencia entre esta tecnología y otras del mismo grupo (destilación al vacío y posterior hidrogenación) se basa en el conocimiento de la química de los lubricantes y aditivos presentes en los aceites, en diferentes condiciones de temperatura y tiempo de trabajo del proceso, consiguiendo mejorar las características de los productos acabados, tanto en lo referente a la vida de los catalizadores que intervienen, como con el aumento de la resistencia a la corrosión.

Los pasos básicos de este proceso son los siguientes:

- Pretratamiento: conlleva la precipitación de elementos contaminantes y elimina problemas de suciedad durante la fase de destilación. Al mismo tiempo se alarga la vida de los catalizadores.
- Destilación atmosférica: elimina agua e hidrocarburos.
- Destilación al vacío y en película fina: conlleva la recuperación de los hidrocarburos de los aceites lubricantes.
- Hidrogenación: fase de purificación del aceite.
- Fraccionamiento: obtención de distintas fracciones de aceites de base.

Esta tecnología es mejor que otras basadas en el mismo proceso por el hecho de que los equipos no se deben limpiar con tanta frecuencia. Con esta tecnología se obtienen aceites de base de gran calidad.

Evergreen Oil en Newark (California) y Breslube en Windsor (Canadá) tienen la licencia de esta tecnología.

1.3.2.3 Tecnología Berc o Niper. Tecnología desarrollada por Bartlesville Energy Research Center en EUA, posteriormente red denominado National Institute of Petroleum and Energy Research.

El proceso es similar al KTI comentado anteriormente, pero incorpora la variación de añadir un tratamiento con disolventes.

Los pasos básicos de este proceso son los siguientes:

1. Destilación atmosférica: fase de deshidratación a presión atmosférica.
2. Destilación al vacío: eliminación de hidrocarburos ligeros.
3. Pretratamiento con disolventes: incorporación, en la proporción de 3:1 de un disolvente compuesto por alcohol butílico, alcohol isopropílico y metil etil cetona en la proporción 1:2:1 que conlleva la extracción de compuestos que potencialmente pueden ensuciar los productos resultantes.
4. Recuperación de los disolventes: mediante procesos de sedimentación y/o centrifugación se separa la mezcla aceite usado-disolvente de los metales pesados,

aditivos y otros compuestos que ensucian la mezcla. El disolvente se recupera para su reutilización.

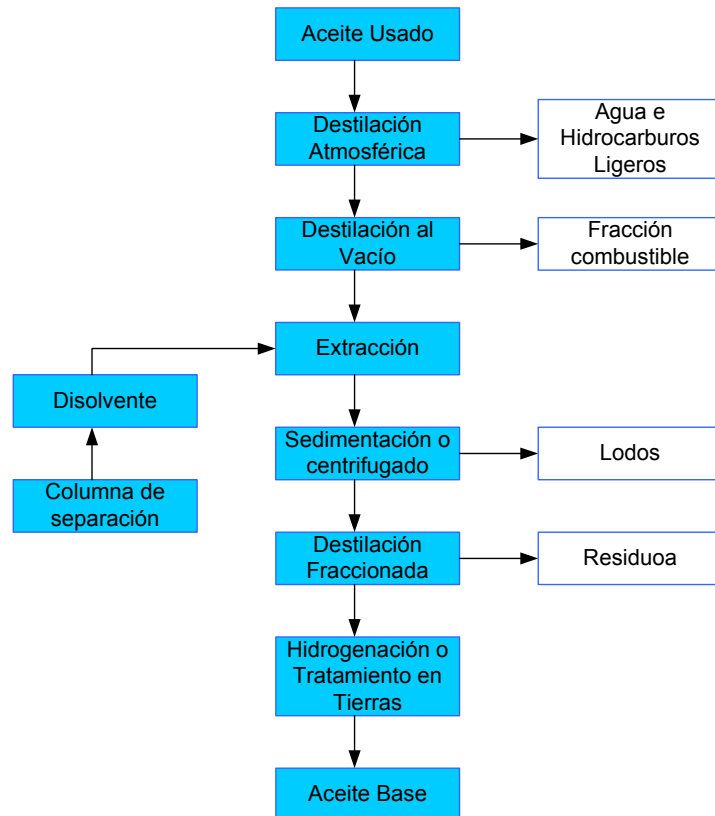
5. Destilación fraccionada: se consiguen distintas fracciones de aceites de base.

6. Tratamiento de hidrogenación o tratamiento en tierras: se consigue la eliminación de impurezas, mejorando así el color y olor de los productos finales.

Esta tecnología permite obtener rendimientos entre el 75% y 85% de aceites de base. Los residuos resultantes del proceso tienen aplicaciones asfálticas, consiguiéndose mejoras económicas respecto a las tecnologías basadas en tratamientos ácido/tierras.

Como inconvenientes más destacables se debe mencionar el elevado coste energético que tiene la extracción con disolventes.

Figura 4. Diagrama de la tecnología Berc o Niper



Fuente: Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Febrero 2001

1.3.2.4 Tecnología Prop. Desarrollada por la compañía Phillips petroleum, incorpora una fase de desmetalización química para eliminar los elementos contaminantes de los aceites usados.

Los pasos básicos de este proceso son los siguientes:

1. Desmetalización: da lugar a la disminución de los metales pesados contenidos en los aceites mezclando el aceite usado con una solución acuosa de fosfato diamónico, formándose compuestos de fosfatos metálicos.
2. Separación de los fosfatos metálicos: los fosfatos metálicos formados en la fase anterior se eliminan por filtración.
3. Destilación al vacío: se eliminan los hidrocarburos ligeros y el agua.

4. Tratamiento en tierras y catalizador Ni / Mo: se mezcla el aceite con hidrógeno, pasándose por un lecho de tierras con el catalizador de Ni / Mo.
5. Hidrogenación: durante esta fase se eliminan los compuestos sulfurosos, oxigenados, clorados y nitrogenados, mejorándose así el color del aceite resultante.

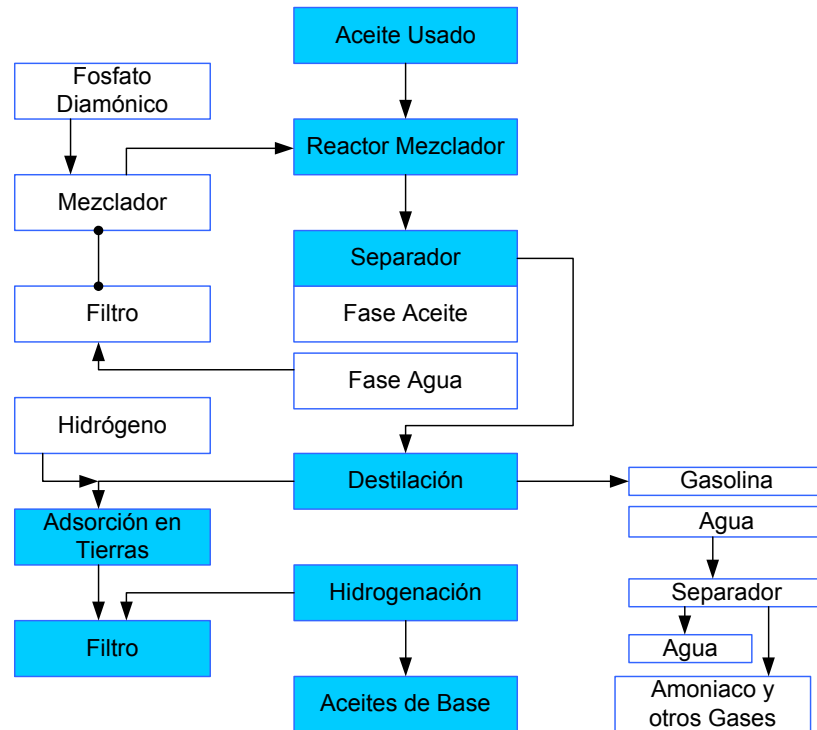
Como ventajas de esta tecnología se puede citar la alta calidad de los aceites de base obtenidos, que contienen menos de 10 ppm de metales, elementos sulfurosos y nitrogenados, producción de un 90% de aceites de base y que la tecnología es altamente respetuosa con el medio ambiente.

Los inconvenientes más importantes son el alto coste de la inversión y que la fase de hidrogenación requiere un tratamiento absorbente con tierras.

La única planta de tecnología PROP en funcionamiento actualmente esta situada en México.

Se adjunta a continuación el diagrama del proceso.

Figura 5. Diagrama de la tecnología Prop



Fuente: Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Febrero 2001

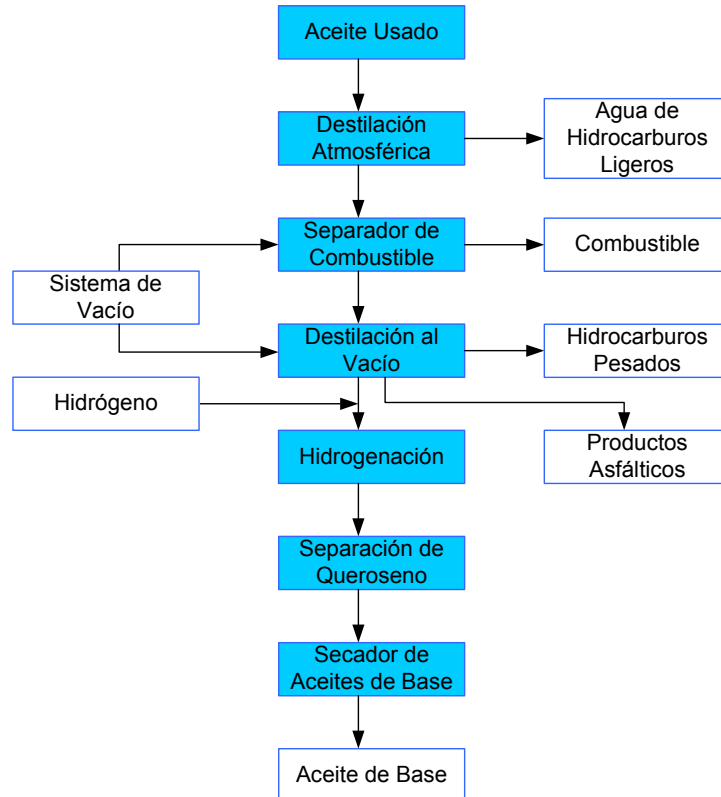
1.3.2.5 Tecnología Safety Kleen. Esta tecnología es la resultante de la combinación de la destilación al vacío en película fina y la hidrogenación a través de lecho catalítico.

Los pasos básicos de este proceso son los siguientes:

1. Destilación atmosférica: fase de eliminación de agua y disolventes ligeros.
2. Destilación al vacío con evaporadores de película fina: se separan los aceites lubricantes de los disolventes pesados.
3. Hidrogenación por medio de lecho catalítico de Ni / Mo: fase en la que se da estabilidad térmica, de color y olor, reduciéndose el contenido en compuestos aromáticos, agentes potenciales de mutaciones.
4. Separación de queroseno.

5. Secado del aceite base: fase final de obtención de los aceites de base.

Figura 6. Diagrama de la tecnología Safety Kleen



Fuente: Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Febrero 2001

Los hidrocarburos resultantes de la destilación atmosférica, así como todos los compuestos ligeros obtenidos en los distintos pasos, se utilizan como combustible en la planta, después de un tratamiento previo debido al elevado contenido en cloro. El lecho catalítico también se regenera y las aguas resultantes de la destilación también se someten a un tratamiento adecuado. Es por esto que la tecnología Safety Kleen es una tecnología que no genera subproductos colaterales. Actualmente hay una planta en funcionamiento en East Chicago, Indiana (USA), y otra en Breslau (Canadá).

1.3.2.6 Tecnología IFP / Tecnología Snamprogetti. La tecnología IFP desarrollada por el "Institut Frangais du Petrole", también se conoce con el nombre de Selectopropane Process. Este proceso combina la destilación al vacío y la hidrogenación, pero en este caso la extracción se realiza mediante propano líquido. Esta extracción es similar a la que se realiza en las refinerías de crudo de petróleo para separar los asfáltenos.

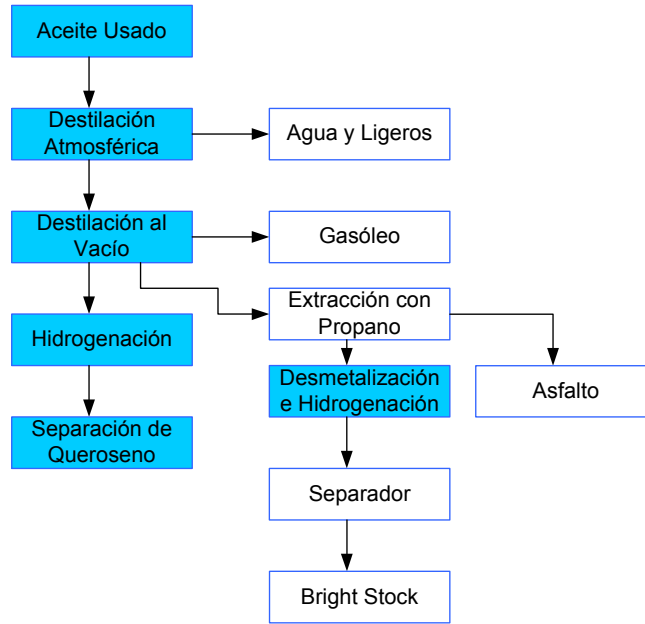
Los pasos básicos de este proceso son los siguientes:

1. Destilación atmosférica: eliminación de agua e hidrocarburos ligeros.
2. Destilación al vacío y extracción de la parte oleosa mediante propano: el aceite procedente de la destilación atmosférica se somete a una extracción con propano líquido a una temperatura entre 75 y 95 °C. En esta fase se recuperan aceites de base ligeros y medios.
3. Hidrogenación: fase en la que se separa el propano de la mezcla propano-aceite. En esta fase también se separan componentes asfálticos, hidrocarburos oxidados y sólidos en suspensión. Del residuo procedente de la destilación al vacío se recupera la fracción "bright stock".
4. Fase final de hidrogenación de la fracción "bright stock".

Hay una diferencia entre el proceso IFP y el Snamprogetti en cuanto a la recuperación del bright-stock. En el proceso IFP se hace la extracción del residuo con el propano que queda de la destilación al vacío. La fracción obtenida se desmetaliza y se hidrogena a través de dos lechos catalíticos, obteniendo el "bright stock". En el proceso Snamprogetti se hace una segunda extracción con propano del residuo de la destilación al vacío, que se junta con el destilado al vacío para realizar una única hidrogenación final.

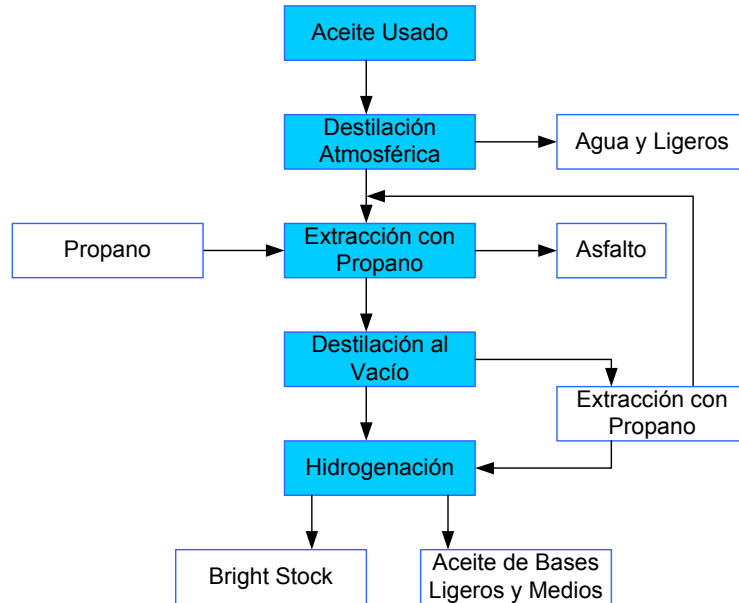
A continuación se presentan los diagramas de cada una de las dos tecnologías.

Figura 7. Diagrama de la tecnología IFP



Fuente: Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Febrero 2001

Figura 8. Diagrama de la tecnología Snamprogetti



Fuente: Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Febrero 2001

1.3.2.7 Tecnología UOP DCH. La tecnología UOP DCH conlleva el tratamiento del aceite usado mediante gas hidrogeno a una cierta temperatura y, mediante una separación adecuada, se eliminan los sólidos y elementos metálicos. Durante el proceso se consigue la destrucción directa de compuestos halogenados y mediante oxigeno se obtienen hidrocarburos ligeros de alta calidad. La hidrogenación se realiza en un reactor provisto de lecho catalítico.

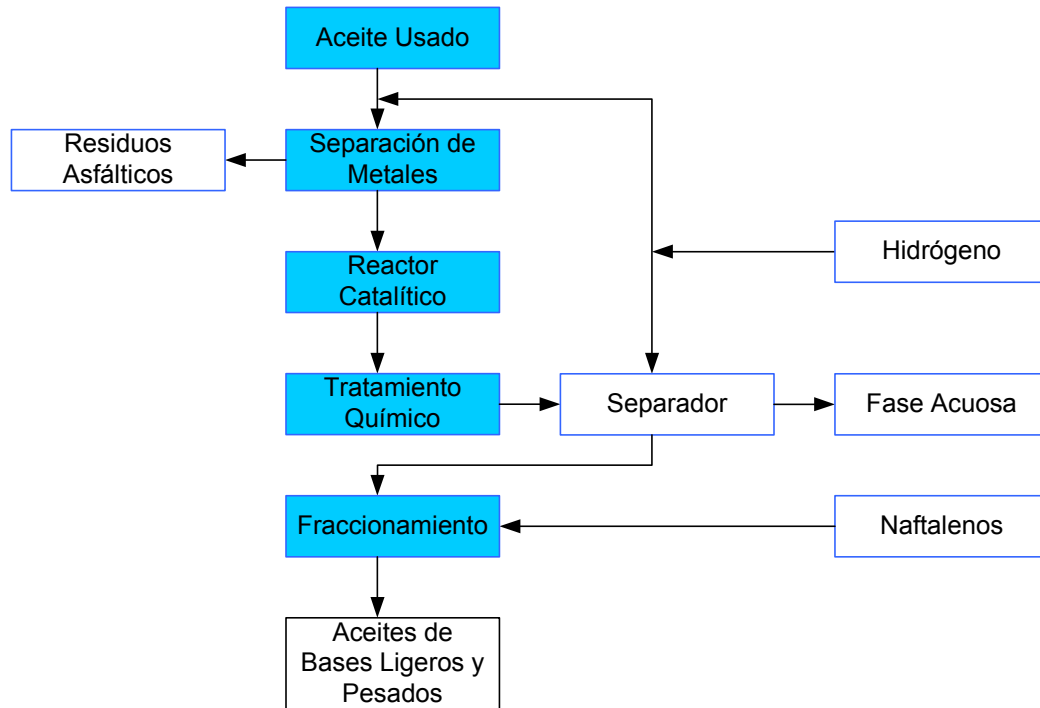
Los pasos básicos del proceso son los siguientes:

1. Hidrogenación.
2. Separación de sólidos y metales.
3. Reactor catalítico.
4. Tratamiento químico de neutralización de gases ácidos.
5. Separación de fase acuosa.

Este proceso permite reciclar aceites usados potencialmente peligrosos, mediante un sistema económico que da un buen rendimiento y una buena calidad de los productos obtenidos.

Esta tecnología se ha probado en plantas piloto y por el momento no se ha comercializado.

Figura 9. Diagrama de la tecnología UOP DCH



Fuente: Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Febrero 2001

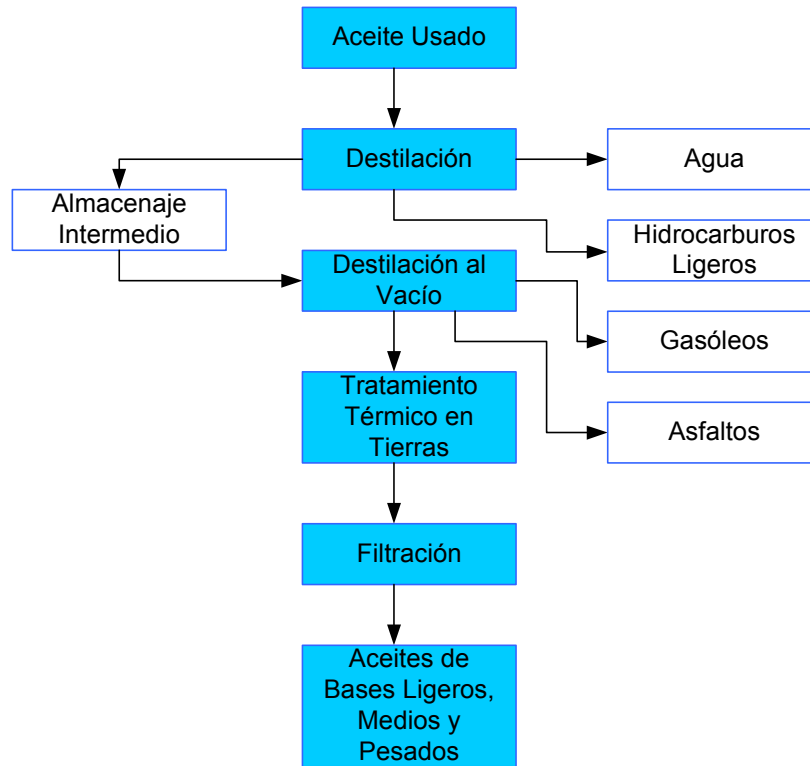
1.3.3 Procesos de destilación al vacío y tratamiento en tierras

1.3.3.1 Tecnología Viscolube. La tecnología Viscolube, también conocida como TDA (Thermal Deasphalting) se basa en la utilización de propano, seguido de una destilación al vacío y tratamiento final en tierras.

Los pasos básicos del proceso son los siguientes:

1. Destilación: la fase conlleva la separación del agua y compuestos ligeros.
2. Destilación al vacío (columna TDA) y fraccionamiento: en esta fase se separan compuestos órgano-metálicos y minerales asfálticos y se producen tres fracciones de aceites de base.
3. TCT (tratamiento térmico en tierras): fase en la que se mejoran las características de las tres fracciones de aceites de base separadas en la fase anterior.
4. Filtración a presión.

Figura 10. Diagrama de la tecnología Viscolube



Fuente: Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Febrero 2001

Las ventajas de esta tecnología son el bajo coste de inversión, las fracciones de aceites de base obtenidas son de alta calidad, los costes de mantenimiento de la instalación son bajos, ambientalmente se trata de un proceso limpio y la fase de destilación al vacío no requiere presiones muy bajas. La filtración a presión permite la reconversión de las plantas de tratamiento basadas en tecnologías ácido/tierras con cierta facilidad.

Como mayores inconvenientes se debe destacar que el rendimiento obtenido es de un 72% (inferior al obtenido con tecnologías de hidrogenación), no admite aceites con un contenido en PCB's superior a 25 ppm, y que se pueden dar problemas para el posterior tratamiento de las tierras utilizadas durante el proceso

Actualmente hay plantas que utilizan esta tecnología a Pieve Fissiraga (Milán, Italia) puesta en funcionamiento en 1992, la segunda entró en funcionamiento en Polonia en 1994 y una tercera en Italia en 1995.

1.3.3.2 Tecnología RTI. La tecnología RTI utiliza por primera vez torres de destilación al vacío de tipo ciclónico, trabaja hasta 20 mm de Hg, el aceite se inyecta a gran velocidad y los aceites obtenidos se someten a un tratamiento de limpieza a través de tierras y posterior filtrado en filtro de prensa.

Los pasos básicos de este proceso son los siguientes:

1. Separación del agua: fase de deshidratación y calentamiento del aceite usado.
2. Destilación atmosférica: fase de eliminación de las emulsiones acuosas y fracciones combustibles.
3. Destilación al vacío: fase de vaporización de fracciones combustibles medias. La destilación se produce a 100 mm Hg.
4. Tratamiento en tierras: fase de refinado y mejora de las características de las fracciones obtenidas.
5. Destilación al vacío: fase de destilación en torres ciclónicas a una presión de 20 mm Hg. El aceite se inyecta a alta velocidad, generándose una fuerza centrífuga que ayuda a la separación de los aditivos y contaminantes que todavía hay en la fracción de aceite usado.
6. Tratamiento en tierras: el aceite obtenido en la fase anterior se mezcla con tierras de diatomeas y tierras activas, para finalmente someterlo a filtrado.

Este proceso también permite la transformación de plantas basadas en tecnologías ácido/ tierras.

1.3.3.3 Tecnología Interline. Esta tecnología conlleva una de las más recientes innovaciones en las tecnologías de destilación al vacío y tratamiento en tierras. En este caso el tratamiento químico se substituye por una extracción con propano, en fases iniciales, y a temperatura ambiente.

Los pasos básicos de este proceso son los siguientes:

1. Extracción con disolventes.
2. Separación del aceite.
3. Destilación atmosférica.
4. Destilación al vacío.
5. Tratamiento de filtrado en tierras.

Desde el punto de vista económico, este proceso es interesante ya que elimina la destilación en película fina así como la necesidad de hidrogenación. Los costes de inversión son bajos, así como los costes de mantenimiento.

Como inconvenientes se debe destacar el hecho de que esta tecnología no acepta aceites que contengan PCB"s, y el contenido en cloro del aceite usado ha de ser como máximo de 1.000 ppm. La eliminación de tierras procedentes del filtrado final también puede ocasionar problemas.

Hay una planta que utiliza esta tecnología en Salt Lake City (USA), y en 1996 se puso otra en funcionamiento en Stoke-on-Trent (Inglaterra). En Sandy (Utah) hay otra, y en fase de montaje existe una en Seúl (Corea).

1.3.3.4 Tecnología Rose – Kellog. Esta tecnología permite tratar aceites usados procedentes de motores mezclados con grasas lubricantes, cuando el contenido no es superior al 5%. Se debe tener en cuenta que el 85% de una grasa es aceite.

El proceso consiste en la extracción con propano en dos fases. En la primera fase se extraen asfáltenos sometiendo el aceite a una temperatura y presión determinadas. En la segunda fase, la solución de aceite y disolvente se somete a temperatura y presión supercrítica que facilita la separación del aceite y del disolvente, que se recupera y reutiliza nuevamente en el ciclo.

Los pasos básicos de esta tecnología son:

- Extracción con disolvente.
- Separación de asfáltenos
- Separación de aceite

- Destilación al vacío
- Hidrogenación.
- Fraccionamiento.

Esta tecnología, con la recuperación del disolvente en condiciones supercríticas, permite un ahorro energético importante. Al igual que la tecnología Interline, también permite la recuperación del aceite contenido en las grasas.

Esta tecnología se está utilizando actualmente en Houston (Texas) por parte de la compañía M.W. Kellog Company.

1.3.4 Otras tecnologías. Se describen a continuación los procesos de otras tecnologías que no se pueden englobar dentro de los grupos manifestados anteriormente.

1.3.4.1 Tecnología entra. La tecnología Entra se puede comparar con las anteriores tecnologías descritas en el grupo de destilación al vacío y tratamiento en tierras porque también utiliza estos procedimientos. La diferencia está en que la destilación al vacío se realiza en unos reactores tubulares en los que el aceite usado se convierte en vapor por el aumento rápido de la temperatura. Posteriormente se somete el vapor a una condensación fraccionada. El proceso de evaporación se produce por inyección del aceite a velocidad constante y consiguiendo una temperatura de 400 °C. El aceite obtenido en esta fase está libre de impurezas sólidas, elementos metálicos y otros.

Posteriormente, se produce otra fase en la que se consigue la purificación y decoloración del aceite destilado. En esencia, se realiza un tratamiento a alta temperatura, durante el que se añade sodio que se combina con los elementos clorados produciendo cloruro sódico.

En caso de ser necesario, para mejorar el color, se hace un posterior tratamiento en tierras.

Los pasos básicos de este proceso son los siguientes:

1. Fase previa: fase de destilación al vacío a 130 °C y 100 mm Hg de presión. La fase conlleva la separación de agua y elementos ligeros.
2. Fase de limpieza: se produce una destilación a 400°C, consiguiendo la separación de compuestos metálicos y otras impurezas sólidas.
3. Fase de decoloración y purificación: fase en que se consigue mejorar el aspecto visual de los aceites, así como la separación de los compuestos clorados por adición de sodio.

Se trata de un proceso de alto rendimiento, en el que el control de la temperatura es muy importante para conseguir los resultados deseados. El proceso está considerado como de tecnología limpia según la IACT (International Association for Clean Technology). Los análisis de TÜV (Technische Überwachungsverein) indican la eliminación total de PCB"s. Como mayor inconveniente se debe contemplar la manipulación del sodio, que es compleja y arriesgada.

Desde 1988, hay una planta piloto que utiliza esta tecnología en Achem (Alemania).

1.3.4.2 Tecnología Recyclon. Esta tecnología se basa en la tecnología Entra comentada anteriormente. Se da tratamiento con sodio y destilación al vacío.

Los pasos básicos de estos procesos son los siguientes:

- Separación mecánica de sólidos y agua libre.
- Destilación para eliminar otras impurezas y agua.
- Tratamiento químico en reactor mediante la aplicación de sodio.
- Destilación para separar compuestos con bajo punto de ebullición.
- Separación por evaporación de los aceites de base de los residuos.
- Destilación final para obtener aceites de base de distinta viscosidad.

Con esta tecnología se obtienen aceites de base de alta calidad, con buenas características de color y olor. Los residuos generados durante el proceso tienen un alto poder calorífico y un bajo contenido en sulfuros, recirculándose al proceso como

combustible. No se requiere tratamiento en tierras ni procesos de hidrogenación y se dan pocas emisiones al aire.

1.3.4.3 Tecnología Krupp Koppers supercrítico. Esta tecnología conlleva el tratamiento de los aceites usados utilizando hidrocarburos gaseosos en condiciones supercríticas.

El proceso consiste en la destilación atmosférica del aceite usado para eliminar agua e hidrocarburos ligeros. Posteriormente se da una mezcla con etano y se somete la mezcla a condiciones supercríticas, consiguiendo la separación del aceite de los elementos contaminantes. La mezcla de aceite y disolvente se somete a un tratamiento de destilación para conseguir su separación. El disolvente se reutiliza nuevamente en el proceso.

Los pasos básicos de este proceso son los siguientes:

- Predestilación.
- Extracción.
- Destilación.

En el caso que los aceites regenerados contengan PCB"s, se puede realizar un tratamiento de hidrogenación.

Los aceites de base obtenidos según esta tecnología se han testado con éxito por parte de MWB-B, CEC L-12-A-76, DIN 51361.

1.3.4.4 Tecnología Vaxon. La tecnología Vaxon, también conocida como VCFE (Vacuum Cyclon Flash Evaporator, desarrollada en Dinamarca), utiliza evaporadores de tipo ciclónico que permiten una fácil limpieza de la suciedad formada. La tecnología combina el efecto de vacío con un sistema de calefacción de diseño especial.

Los pasos básicos de este proceso son los siguientes:

- Destilación fraccionada al vacío: en esta primera fase se consigue la separación de agua, hidrocarburos ligeros, compuestos metálicos y otros elementos

bituminosos. Esta fase se desarrolla en cuatro módulos en condiciones de temperatura y vacío diferentes, obteniéndose en los dos últimos módulos aceites de base aptos para los tratamientos posteriores.

➤ Tratamiento químico: los aceites de base procedentes de la fase anterior se tratan con hidróxido potásico, mediante control de temperatura, consiguiendo una mayor limpieza del aceite. En esta fase se produce el secado del aceite.

➤ Destilación al vacío: fase de destilación final al vacío para conseguir un producto apto a las necesidades y condiciones del mercado

Esta tecnología permite la obtención de aceites de base aptos para la fabricación de nuevos aceites de motor o como lubricantes industriales. Se trata de aceites de alta calidad que han obtenido la homologación siguiendo las normas más exigentes que existen en la actualidad.

Se trata de una tecnología ambientalmente limpia, ya que los residuos generados en el proceso se recirculan en el mismo proceso.

Actualmente se conoce una planta que utiliza esta tecnología en Cataluña (España), la compañía es Cator (Catalana de Tractament d'Olis Residuals, S.A.).

1.3.4.5 Tecnología CEA. La tecnología CEA (Comisión Francesa de la Energía Atómica), actualmente en sus estadios iniciales, consiste en mezclar aceite usado de motores de combustión con dióxido de carbono en condiciones supercríticas, con temperaturas comprendidas entre 40°C y 80°C y presiones de 148 atm. En una fase posterior se utiliza una membrana cerámica de ultra filtración para extraer las impurezas.

1.3.5 Resumen de las tecnologías mencionadas. A continuación se ponen de manifiesto las tecnologías anteriormente expuestas y los pasos ordenados de cada una de las tecnologías. Los números en la tabla 1 indican las repeticiones de cada uno de los procesos que deben ser aplicados al aceite usado, dependiendo de la tecnología utilizada.

Tabla 1: Resumen de las Tecnologías

	Meinken	KTI	Mohawk	Berc-Niper	Prop	Safety Kleen	IFP	Snamprogetti	UOP DCH	Viscoluble	RTI	Interline	Rose Kellog	Entra	Recyclon	Vaxon	CEA
Destilación Atmosférica	1	1	2	1		1	1	1		1	2	3					
Pretratamiento Químico			1														
Desmetalización					1												
Separación											1						
Extracción Disolvente				3			4	2.5				1	1				
Recuperación				4				3				2					
Tratamiento Ácido-tierras	2																
Destilación al Vacío		2	3	2	2		2	4	3	2	3.4	4	2	1.2	1	1	
Tratamiento Químico									2					3	2	2	
Hidrogenación		3	4	6	3	3	3.5	6	1	3			3				
Destilación Película Fina	3					2								4	3	3	
Fraccionamiento		4	5	5	4				4				4				
Tratamiento en Tierras				7								5					
Autoclave, Ultrafiltración																	x

Fuente: Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL). Febrero 2001

1.4 UTILIZACIÓN DEL RESIDUO COMO COMBUSTIBLE

1.4.1 Concentración de contaminantes vs límites máximos permisibles.

Gracias a los estudios realizados por Lahcorp* y Lupien Rosenberg et Associes se han podido identificar las características típicas de los aceites lubricantes usados, las cuales se relacionan en la tabla 1.

Tabla 2. Características de los aceites usados en Colombia.

CARACTERÍSTICAS	AUTOMOTOR	INDUSTRIAL
Viscosidad a 40° C, SSU*	97 - 120	143 - 330
Gravedad a 15.6° C, API	19 - 22	25.7 - 26.2
Peso específico a 15.6° C	0.9396 - 0.8692	0.9002 - 0.8972
Agua % Vol.	0.2 - 33.8	0.1 - 4.6
Sedimentos % Vol.	0.1 - 4.2	0.0
Insolubles en Benceno, % en peso	0.56 - 33.3	0.0
Solubles en Gasolina, % Vol.	2.0 - 9.7	0.0
Punto de ignición °C	78 - 220	157 - 179
Potencia Calorífica, MJ/kg.	31.560 - 44.880	40.120 - 41.840

*Segundo Saybolt Universal

Fuente: Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001

También se logró establecer cuales contaminantes están generalmente presentes en los aceites usados y su concentración en el residuo, éstos se relacionan en la tabla 3.

Tabla 3. Contaminantes generalmente presentes en los aceites usados y su concentración.

CONTAMINANTE	ORIGEN	CONCENTRACIÓN (ppm)
Bario	Aditivos detergentes	Menor a 1000
Calcio	Aditivos detergentes	1000 - 3000
Plomo	Gasolina plomada - desgaste de piezas	100 - 1000
Magnesio	Aditivos detergentes	100 - 500
Zinc	Aditivos antidesgaste y antioxidantes	500 - 1000
Fósforo	Aditivos antidesgaste y antioxidantes	500 - 1000
Hierro	Desgaste del motor	100 - 500
Cromo	Desgaste del motor	Trazas
Níquel	Desgaste del motor	Trazas
Aluminio	Desgaste de rodamientos	Trazas
Cobre	Desgaste de rodamientos	Trazas
Estaño	Desgaste de rodamientos	Trazas
Cloro	Aditivos - gasolinas plomadas	300
Silicio	Aditivos	50 - 100
Azufre	Base lubricante - productos de combustión	0.2 - 1.0 %
Agua	Combustión	5 - 10 %
Hidrocarburos livianos	Dilución del combustible	5 - 10 %
PAH	Combustión incompleta	Menor a 1000

Fuente: Collection and disposal of used lubricating Oils, Concawe report 5, 1996.

Conocer estas características nos permite realizar una comparación con los parámetros que dicta la norma que limita las cantidades máximas de compuestos contaminantes presentes en un combustible. Esta es la U.S. EPA “Environmental Protection Agency” (agencia de protección ambiental de USA), los límites que dicta ésta norma se relacionan en la tabla 4.

Tabla 4. Cantidades máximas de compuestos contaminantes permisibles en un combustible.

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN MÁXIMA PERMISIBLE (mg/l. - ppm)
Bifenilo Policlorado (PCB)	50
Halógenos orgánicos totales (como Cl.)	1.000
Arsénico	5
Cadmio	2
Cromo	10
Plomo	100
Azufre	1.7 %
Mercurio	x

Fuente: U.S. EPA - United States Environmental Protection Agency

Al comparar los límites establecidos con la concentración de contaminantes presentes en los aceites usados, podemos observar que estas concentraciones superan lo dispuesto por las normas, por lo tanto el aceite usado no puede ser utilizado como combustible sin realizar un proceso previo de acondicionamiento que disminuya la cantidad de estos contaminantes por debajo de las concentraciones que especifican las normas pertinentes.

La tabla 5. Muestra los niveles máximos de contaminación permisibles en aceites usados en otros países, esta información ratifica el hecho de que la combustión de este material sin un proceso previo de acondicionamiento no es permitida, y se considera inconveniente en todo el mundo.

Tabla 5. Niveles máximos de contaminación permisibles en aceites usados.

PAIS	CONTAMINANTES (ppm)					
	ARSENICO	CADMIO	CLORO	PLOMO	HALOGENO	PCBs
AUSTRALIA	10	3	---	10	---	---
U.S.A.	5	2	10	100	4000	50
SUIZA	20	0.8	---	50	1 % W	50
EUROPA (CONCAWE)	---	0.5	100	5	---	50

Fuente: Collection and disposal of used lubricating Oils, ConcaWE report 5, 1996.

Los límites de emisiones en Europa, aplican para la combustión de Aceite usado en equipos que manejen una potencia mayor a 3 MW.

1.4.2 Distribución de contaminantes durante el proceso de combustión.

Según diversos estudios los contaminantes presentes en un combustible solo pueden tener como destino final tres corrientes durante la combustión industrial, estas son:

- Escorias: que permanecen dentro del hogar del sistema de combustión y solo se remueven cuando el equipo se abre para limpieza total, o por medio de sistemas de retiro de escorias (o cenizas), que pueden ser continuos o intermitentes.
- Cenizas Volantes: que pueden ser removidas de la corriente gaseosa, antes de la chimenea por medios mecánicos tales como filtros, lavadores, etc.
- Gases de combustión o gases de chimenea: que no son removidos por los equipos anteriormente citados, y que pueden ser removidos por procesos de absorción y de reacción química, que generalmente son costosos, por lo que se usan en pocas partes, normalmente instalaciones de gran tamaño. En

consumidores energéticos pequeños no se utilizan y por tanto estos gases son liberados a la atmósfera.

La tabla 6 muestra como se distribuye cada uno de los contaminantes que contiene el aceite usado entre estas tres corrientes de salida.

Tabla 6. Distribución porcentual de contaminantes en las corrientes de salida.

COMPUESTO	CHIMENEA (%)	ESCORIA (%)	CENIZAS VOLANTES (%)
Carbón	98	1.6	0.4
Flúor	27	39	34
Cloro	67	13	20
Azúfre	40	34	26
Hierro	0.02	99	1
Mercurio	72	4	24
Zinc	4	51	45
Plomo	6	58	36
Cadmio	12	12	76

Fuente: Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001.

Nuevamente la comparación de los resultados mostrados en la tabla anterior con los contenidos de contaminantes pesados en el aceite usado, muestran claramente la necesidad de remover estos contaminantes antes de utilizar este material en un proceso de combustión, o en procesos que permitan la liberación de metales pesados a la atmósfera.

También por efectos de la combustión se generan otros contaminantes, que dependen menos de la calidad del combustible y más del control de la operación de la combustión, ellos son: CO, SOx, NOx y material particulado principalmente.

1.4.3 Impacto de los contaminantes normalmente presentes en los aceites usados, para la salud humana. Para dimensionar el impacto que tendría ignorar el riesgo de quemar el aceite usado sin tratamiento previo o realizar cualquier otro proceso que permitiera la liberación de los contaminantes que este contiene, enunciaremos las consecuencias para el ser humano al tener contacto con ellos.

La toxicidad y peligrosidad de estos metales dependen de dos variables principalmente: la concentración del contaminante y el tiempo de exposición.

1.4.3.1 Cadmio (Cd). Respirar altos niveles de cadmio produce graves lesiones en los pulmones y puede producir la muerte. Ingerir alimentos o tomar agua con niveles de cadmio muy elevados produce seria irritación al estómago e induce vómitos y diarrea.

El cadmio puede acumularse en los riñones a raíz de exposición por largo tiempo a bajos niveles de cadmio en el aire, los alimentos o el agua; esta acumulación puede producir enfermedades renales.

Lesiones en los pulmones y fragilidad de los huesos son otros efectos posibles causados por exposición de larga duración.

1.4.3.2 Plomo (Pb). Un cuerpo humano no puede advertir la diferencia entre plomo y calcio, razón por la cual el plomo es absorbido por los huesos, en donde puede quedar acumulado por el resto de la vida. Los efectos crónicos son atribuidos a menudo a exposiciones pequeñas acumuladas durante un largo período de tiempo. Síntomas precoces: fatiga, dolores de cabeza, dolores óseos, dolores abdominales, trastornos del sueño, dolores musculares, impotencia y trastornos de conducta.

Como estos síntomas son comunes a diversos problemas de salud, pueden pasar fácilmente desapercibidos.

Síntomas avanzados: anemia, cólicos intestinales, náusea y vómito, enfermedad renal, impotencia sexual, delirio, esterilidad, teratogenia (daños al feto), hipertensión arterial, estreñimiento agudo, afectación de los nervios, enfermedad ósea, cáncer y muerte.

Por otra parte, los niños de seis años o menos enfrentan peligros especiales. Al estar sus cuerpos en rápido desarrollo, incluso la exposición a bajos niveles de plomo puede tener efectos permanentes, incluyendo daños al sistema nervioso y al riñón, debilitamiento de los músculos y del crecimiento óseo. Se ha demostrado también que la sobre exposición al plomo puede dañar el desempeño intelectual de los niños, causando dificultades para el aprendizaje y un decrecimiento de la inteligencia.

1.4.3.3 Mercurio (Hg). El mercurio es un metal plateado, extremadamente venenoso. Cantidades muy pequeñas pueden dañar a los riñones, el hígado y el cerebro, puede causar dolor, entumecimiento, músculos débiles, pérdida de la vista, parálisis y aún la muerte. La exposición a nivel local del Mercurio ocasiona irritación de la piel, mucosa y es sensibilizante de la piel.

Envenenamiento por mercurio: En casos de intoxicaciones agudas fuertes con Mercurio, se produce una intensa irritación en las vías respiratorias, que es productor de bronquitis, neumonías, bronqueolitis, etc.

En intoxicaciones crónicas y a dosis bajas produce: debilidad, pérdida de peso, diarrea, inflamación de encías, fatiga, sabor metálico, insomnio, indigestión, etc.

En intoxicaciones crónicas y a dosis altas produce: irritabilidad, alucinaciones, llanto, excitabilidad, depresiones, tristeza, psicosis, Crisis.

El cuerpo no se puede deshacer del mercurio, por lo tanto, éste se va acumulando paulatinamente en los tejidos. En casos de exposición a altas dosis en forma oral, colapsa el aparato digestivo, siendo mortal en horas.

1.4.3.4 Cromo (Cr). Afectaciones locales: causa dermatitis, sensibilización de la piel, es irritante de la piel y mucosas.

Afectaciones generales: produce tos, bronquitis crónica, ulceraciones del tabique nasal y piel, dolores respiratorios y de cabeza, hemorragia nasal y dermatitis.

1.3.3.5 Bario (Ba). El bario es un metal de color plata blanco que se presenta naturalmente combinado con otros químicos, como azufre, carbón y oxígeno. Los compuestos de bario son usados por la industria del petróleo y gas para hacer lodos de perforación y en la industria de lubricantes se utilizan sus compuestos como aditivos de acción detergente.

Los efectos sobre la salud de diferentes compuestos de bario, dependen del grado de disolución de este compuesto en el agua. Aquellos que no se disuelven bien en el agua son muy peligrosos y generalmente son utilizados para propósitos médicos, los que se disuelven bien en el agua pueden tener efectos nocivos tales como dificultad al respirar, aumento de la presión sanguínea, cambios en el ritmo cardiaco, irritación estomacal, edema cerebral, debilidad muscular, daños al hígado, riñón, corazón y baso.

No se conocen los efectos sobre quienes ingieren bajas concentraciones de bario durante largo tiempo, pero estudios en animales han mostrado incrementos en la presión sanguínea y cambios en el corazón. Aún no se conocen los efectos del bario al inhalarlo o tocarlo. El departamento de salud y servicios humanos, la agencia internacional de investigación en cáncer y la U.S. EPA no han clasificado este elemento como carcinógeno humano.

1.4.3.6 Aluminio (Al). El aluminio se presenta en forma natural y ocupa aproximadamente el ocho por ciento 8% de la superficie terrestre. Siempre se encuentra combinado con otros elementos como minerales y rocas, en su forma metálica es blanco plateado y de apariencia flexible. Es muy utilizado en la fabricación de utensilios de cocina, contenedores y materiales de construcción entre otros.

En forma combinada el aluminio se utiliza como nitrato, óxido, hidróxido (utilizado como antiácido), clorhidrato (en desodorantes), y sulfatos (para el tratamiento de

aguas). También se utiliza en pinturas y en la producción de caucho, vidrio y cerámica. Todos estamos expuestos a consumir pequeñas cantidades de aluminio a través del aire, los alimentos y el agua. La exposición a altos niveles de aluminio afecta el sistema respiratorio, el sistema nervioso y los huesos, también puede causar defectos en recién nacidos.

Algunos estudios con ratones y conejos expuestos a grandes cantidades de aluminio mostraron que este puede afectar animales jóvenes, causando retrasos en el desarrollo neurológico y del esqueleto. Este elemento también ha sido relacionado con la enfermedad de alzheimer pues estos pacientes presentan altos niveles de aluminio en el cerebro. El departamento de salud y servicios humanos de los estados unidos no ha clasificado el aluminio como carcinógeno humano.

1.4.3.7 zinc (Zn). El zinc es uno de los elementos más comunes en la naturaleza, se encuentra en el aire, suelo, agua y está presente en todos los alimentos. El zinc se utiliza en la fabricación de tejas, baterías y en aleaciones como el bronce. Se combina con otros elementos para formar compuestos tales como cloruro de zinc, óxidos, sulfatos y sulfitos entre otros, estos se utilizan ampliamente en la industria de pinturas, cauchos, tintas y preservantes de madera.

La exposición a altos niveles de zinc se da principalmente a través de los alimentos, el agua y la inhalación del aire. Aunque la exposición a grandes cantidades de zinc puede ser peligrosa, este elemento es esencial para nuestro organismo. Comer grandes cantidades de zinc, incluso por corto tiempo puede causar problemas estomacales, náusea y vómito. Si se consume por un largo periodo de tiempo puede causar anemia, daños al páncreas y bajos niveles de lipoproteína de colesterol de alta densidad (la forma benéfica del colesterol).

Respirar grandes cantidades de zinc (como polvo o humo) puede causar una enfermedad de corto plazo llamada fiebre de humos metálicos, se cree que esta enfermedad es una respuesta del sistema inmunológico que afecta los pulmones y la temperatura corporal. El departamento de salud y servicios humanos de los Estados Unidos no ha clasificado el zinc como carcinógeno humano.

1.4.3.8 Arsénico (As). El arsénico es un elemento natural ampliamente distribuido en la corteza terrestre. En el medio ambiente, se encuentra combinado con oxígeno, cloro y azufre formando compuestos inorgánicos. El arsénico en animales y plantas se combina con carbono e hidrógeno formando compuestos orgánicos. Los compuestos inorgánicos se usan principalmente para preservar madera mientras los orgánicos se usan como pesticidas, principalmente sobre plantas de algodón. El arsénico no puede ser destruido en el medio ambiente solo puede cambiar de forma, en el aire se deposita en el suelo o es removido del aire por la lluvia. Los peces y mariscos pueden acumularlo, pero en una forma que no es perjudicial.

Respirar niveles altos de arsénico inorgánico puede causar dolor de garganta o irritar los pulmones. Ingerir niveles altos de arsénico orgánico puede causar la muerte. Niveles más bajos pueden causar náusea y vómitos, reducción de la producción de glóbulos rojos y blancos, ritmo cardíaco anormal, daño de los vasos sanguíneos y una sensación de hormigueo en las manos y los pies.

Ingerir o respirar niveles bajos de arsénico por largo tiempo puede producir oscurecimiento de la piel y la aparición de pequeños callos o verrugas en las palmas de las manos, las plantas de los pies y el torso. Al contacto con la piel el arsénico inorgánico puede causar enrojecimiento e hinchazón. Los compuestos orgánicos de arsénico son menos tóxicos que los compuestos inorgánicos.

1.4.3.9 Azufre (S). Los óxidos de azufre (SO_x) son gases incoloros que se forman al quemar azufre.

De los compuestos del Azufre: el más destacado es el dióxido de azufre (SO₂), gas incoloro, no inflamable, de olor fuerte e irritante en altas concentraciones, generando problemas respiratorios (tos, irritación de la garganta y silbidos en el pecho) en personas con asma, agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas, los efectos de los óxidos de azufre empeoran cuando el dióxido de azufre se combina con partículas o humedad del aire. Esto se conoce

como efecto sinérgico porque la combinación de sustancias produce un efecto mayor que la suma individual del efecto de cada sustancia.

El dióxido de azufre (SO_2), se combina fácilmente con el agua atmosférica dando ácido sulfúrico, responsable de la lluvia ácida. Se originan de modo natural en las erupciones volcánicas y en la combustión de carburantes con cierto contenido en S (carbón, fuel y gasóleos), procedentes de centrales térmicas, procesos industriales, tráfico de vehículos pesados y calefacciones de carbón y fuel. La cantidad de dióxido de azufre emitido al aire es casi la misma cantidad presente en el combustible. Otros compuestos importantes son el trióxido de azufre (SO_3) y sulfuro de hidrógeno (SH_2).

1.4.3.10 Calcio (Ca). La dispersión de sustancias sólidas o líquidas en el aire, se liberan directamente a la atmósfera por una serie de fuentes fijas y móviles en su mayor parte relacionadas con los fenómenos de combustión, y también en procesos de producción de alimentos, en la industria química e insecticidas. La naturaleza química de las partículas depende del proceso que las haya originado. Destacan los compuestos orgánicos, metales pesados, óxidos metálicos y compuestos de calcio, aluminio y silicio, procedentes de polvo del suelo.

El exceso de calcio se denomina hipercalcemia (exceso de calcio en la sangre), y el primer síntoma es la excreción excesiva de orina (poliuria) con una marcada necesidad de beber constante y abundantemente (polidipsia). También es común la calcificación renal y la formación de cálculos (acumulación de partículas que forman una masa compacta). Los excesos en el nivel nervioso son: depresión de las fuerzas vitales (astenia) y fatiga psíquica. En el ámbito cardiaco: palpitaciones y riesgo de paro cardiaco. A nivel digestivo: anorexia, vómitos y estreñimiento. Y en general los tejidos se calcifican.

Investigadores de la Harvard School of Public Health (EEUU) han presentado un trabajo en la reunión de la American Association for Cancer Research, celebrada en San Francisco (EEUU), en el que advierten que estar expuesto continuamente al calcio puede aumentar el riesgo de sufrir un tumor prostático.

1.4.3.11 Magnecio (Mg). El magnesio es un metal liviano blanco plateado que en gas o polvo puede afectar al respirarlo. El contacto con esta sustancia puede irritar la piel y los ojos.

Respirar el magnesio en polvo puede irritar la nariz, la garganta y los pulmones y causar tos, respiración con silbido y falta de aire.

La exposición repetida al polvo puede hacer que el magnesio se acumule en el cuerpo causando descomposición del estómago. La manera como esta sustancia puede afectar depende del tiempo de exposición, de la concentración de la sustancia y de otros factores.

Efecto crónico en la salud, el efecto crónico (a largo plazo) en la salud puede ocurrir en cualquier momento después de haberse expuesto al magnesio y puede durar meses o años.

No se han realizado pruebas para determinar si el magnesio causa cáncer en los animales. Esto se basa en resultados de estudios publicados actualmente disponibles en el Departamento de Salud y Servicios para Personas Mayores.

1.4.3.12 Fósforo (P). La acumulación de fósforo en aguas residuales que van hacia las cloacas de las ciudades son un sustento para las algas verde-azules que producen dos tipos de sustancias tóxicas: 1) las neurotóxicas, como la anatoxina y 2) las hepatotóxicas como la microcystina producida por la especie *Microcystis aeruginosa*.

Efectos nocivos del fósforo en la salud humana: Las neurotóxicas como las anatoxinas son de tipo bloqueante neuromuscular y cuando están purificadas y concentradas producen parálisis cardio-respiratoria. Las hepatotóxicas afectan al hígado por estancamiento de la sangre y hasta pueden producir un coma hepático. Si el equilibrio entre el calcio y el fósforo en una proporción de 1,5 / 1 no es igual, el fósforo no se absorberá bien. Sobrepasar la dosis de 1,5g diaria puede provocar intoxicaciones disminuyendo la absorción de calcio y magnesio, producen síntomas gastrointestinales, lesiones renales, hepáticas y sobre el sistema cardiovascular. Los efectos crónicos ocasionan lesiones óseas, especialmente en la mandíbula.

1.4.3.13 Cobre (Cu). El exceso de cobre, a partir de tres miligramos al día, puede acarrear complicaciones con síntomas como malestar estomacal, náusea o diarrea, que suelen desaparecer al suprimir la exposición al metal.

En ciertos casos de afecciones genéticas pueden producirse estados tóxicos más complicados, en personas con cirrosis y problemas en el flujo de bilis (como en la enfermedad de Wilson o en la cirrosis biliar primaria) pueden acumular un exceso de cobre en el hígado, que impide deshacerse del exceso de metal en el organismo; Una vez saturado el hígado de cobre, se produce liberación masiva de cobre a la circulación, lo que se manifiesta clínicamente por hemólisis y signos de hepatitis aguda. Finalmente, el exceso de cobre se deposita en tejidos extra hepáticos tales como los núcleos basales del sistema extrapiramidal, la región límbica de la córnea, huesos, articulaciones, y riñones. El diagnóstico debe ser sospechado en niños mayores y adolescentes que presentan disfunción hepática asociada o no con alteraciones neurológicas, psiquiátricas, esqueléticas, hematológicas o renales.

Si las pruebas de laboratorio confirman el exceso de cobre, la mayoría de los doctores recomienda evitar alimentos ricos en este mineral (como chocolate, mariscos e hígado).

1.4.3.14 Hierro (Fe). El exceso de hierro puede ser tan dañino como su falta. Y como los síntomas de la toxicidad por hierro tiene síntomas bastante comunes en cualquier persona (diarrea, vómitos, dolor de cabeza, fatiga, dolores de estómago, vértigo), muchas veces cuesta detectarlo. La retención excesiva de hierro, generalmente causada por una sobre dosificación de suplementos o por una rara condición genética denominada hemocromatosis (en la cuál el cuerpo sobre-absorbe hierro), puede dañar el páncreas, el corazón y el hígado, además de provocar enfermedades cardíacas.

No obstante ser un elemento esencial para la vida, el exceso de hierro puede ser tóxico debido a su capacidad para catalizar las reacciones que forman radicales libres. Las alteraciones del metabolismo del hierro, particularmente como

consecuencia de una absorción o ingesta aumentada, llevan fácilmente a la sobrecarga de hierro, puesto que no existen mecanismos excretores específicos. El aumento de hierro facilita la susceptibilidad a las infecciones, disfunción hepática tumores del intestino grueso, enfermedad vascular coronaria y miocardiopatías. La lipoperoxidación y subsecuente lesión en las membranas celulares parecería ser el común denominador en estas patologías. Por lo tanto los niveles de hierro deben ser cuidadosamente controlados para evitar los efectos deletéreos del exceso de hierro.

Por otro lado el exceso de hierro también pueda estar estrechamente relacionado con la aparición de patologías neurodegenerativas, como el Parkinson.

Sin embargo, la vitamina antioxidante E puede ayudar a reducir los riesgos de exceso de hierro, destruyendo a los radicales libres, (que se producen a causa del excesivo hierro), y evitando que estos le causen daños a las células. La mayoría de los expertos recomiendan 400 unidades internacionales (IU) de vitamina E diaria.

1.4.3.15 Níquel (Ni). El níquel es necesario para la formación de glóbulos rojos, no se debe exceder de 0.05mg/l diarios, valores mayores tienen efectos sobre la salud humana.

Efectos sobre la salud humana

- Efectos agudos: ocasiona dolor de cabeza, vértigo, cianosis, sudoración, síntomas gastrointestinales, alteraciones visuales y cansancio. Produce fibrosis pulmonar y alteraciones renales.-Efectos crónicos: ocasiona lesiones en la piel (dermatitis), respiratorias (bronquitis, asma), renales, disfunción inmunológica y disminución del peso corporal.
- Enfermedad profesional: neumonía aguda.
- Riesgo de cáncer: diversos estudios realizados en personas expuestas profesionalmente evidencian un mayor riesgo de cáncer de la cavidad nasal y pulmonar. El níquel está considerado como un seguro agente cancerígeno para los humanos.
- La intoxicación por níquel da lugar a neumonitis y eczemas.

1.4.3.16 Cloro (Cl). El cloro es una sustancia Inorgánica que es bueno para desinfectar y evitar contaminaciones; pero el exceso de cloro puede producir serios y diversos trastornos como la conjuntivitis química en los niños, puede dejar su pelo seco y quebradizo, su piel descamada, y producir reacciones negativas en niños, personas mayores, y en personas sensibles al cloro. Numerosas investigaciones han demostrado que, *por razones de salud*, lo mejor es eliminar el cloro del agua de beber.

Además, por ser una sustancia tan activa, un exceso de cloro puede reaccionar con distintos compuestos orgánicos, por lo que aumenta el riesgo de que se produzcan trihalometanos, que son compuestos carcinógenos para el ser humano.

1.4.3.17 Silicio (Si). Efectos del silicio sobre la salud: El silicio elemental es un material inerte, que parece carecer de la propiedad de causar fibrosis en el tejido pulmonar. El polvo de silicio tiene pocos efectos adversos sobre los pulmones y no parece producir enfermedades orgánicas significativas o efectos tóxicos cuando las exposiciones se mantienen por debajo de los límites de exposición recomendados. El silicio puede tener efectos crónicos en la respiración. El silicio cristalino (dióxido de silicio) es un potente peligro para la respiración. Sin embargo, la probabilidad de que se produzca dióxido de silicio durante los procesamientos normales es muy remota.

El silicio cristalino irrita la piel y los ojos por contacto. Su inhalación causa irritación de los pulmones y de la membrana mucosa. La irritación de los ojos provoca lagrimeo y enrojecimiento. Enrojecimiento, formación de costras y picores son características de la inflamación cutánea.

El cáncer de pulmón está asociado con exposiciones a silicio cristalino (especialmente cuarzo y cristobalita) en lugares de trabajo.

Diversos estudios epidemiológicos han informado de números estadísticamente significativos de exceso de muertes o casos de desorden inmunológico y enfermedades autoinmunes en trabajadores expuestos al silicio. Estas

enfermedades y trastornos incluyen scleroderma, artritis reumatoide, eritematosis sistémica, sarcoidosis, enfermedades renales y cambios renales subclínicos.

El silicio cristalino puede afectar el sistema inmunitario, resultando en infecciones microbacterianas (tuberculosas y no tuberculosas) o fúngicas, especialmente en trabajadores con silicosis.

La exposición ocupacional al silicio cristalino respirable está asociada con bronquitis, enfermedad crónica de obstrucción pulmonar (COPD) y enfisema. Algunos estudios epidemiológicos sugieren que estos efectos sobre la salud pueden ser menos frecuentes o ausentes en los no fumadores.

1.4.3.18 Hidrocarburos livianos (metano-propano-butano). La combustión incompleta de hidrocarburos livianos conduce a la formación de gases tóxicos, tales como CO, NOx y podrían quedar hidrocarburos sin reaccionar, siendo el CH4 bastante nocivo para el medio ambiente dado que posee una capacidad 21 veces superior que el CO2 para producir el efecto invernadero.

Los hidrocarburos livianos, como el xileno o el tolueno, “están catalogados como residuos peligrosos, ya que tienen efectos cancerígenos cuando se incorporan al agua de consumo humano” con el tiempo, los hidrocarburos se van degradando, oxidando por sí mismos o por acción de microorganismos. Las “pequeñas concentraciones también pueden generar problemas serios, por efectos de acumulación; los tóxicos pueden actuar, aún en niveles muy bajos, si el tiempo de exposición es suficientemente prolongado”.

1.4.3.19 Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAH's). Los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's) (núcleos aromáticos condensados), se encuentran entre los compuestos más tóxicos para la vida y surgen de la combustión de materia orgánica o de combustiones incompletas y se detectan en el aire, como consecuencia del tráfico rodado, y en los residuos sólidos. Algunos de sus componentes tienen efectos cancerígenos y mutágenos probados, como el

alfabenzopireno, los Nitro-hidrocarburos policíclicos aromáticos, derivados nitrosos y nitro-cetonas, derivados nitrohidroxilados.

Los PAH's son compuestos que causan daños en el ADN cuando entran en el cuerpo de un organismo. Estos compuestos se llaman genotoxinas, debido a su efecto genotóxico.

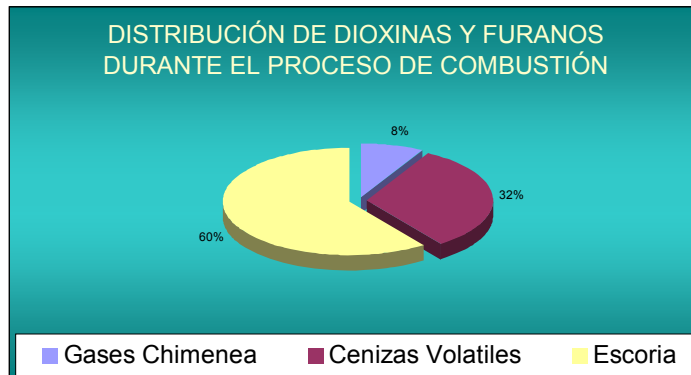
Normalmente, cuando los contaminantes dañan el ADN, un sistema natural de reparación en el organismo lo devolverá a su estado natural, pero cuando este sistema falla por alguna razón, las células con ADN dañado pueden dividirse.

Se producen entonces células mutantes y el defecto se puede extender, haciendo que la descendencia del organismo tenga serios defectos que son a menudo muy perjudiciales para la salud. Las reacciones son normalmente provocadas por compuestos de vida corta altamente reactivos que se producen a partir del compuesto original.

1.4.4 Dioxinas y Furanos. Además de las sustancias que hacen parte del residuo y que pueden ser emanadas durante el proceso de combustión, pueden producirse otros compuestos. Estos son las dioxinas y los furanos, estos compuestos que se forman durante la combustión son extremadamente tóxicos y térmicamente estables hasta una temperatura aproximada de 600 °C, debido a esto son persistentes en el medio. Someter las dioxinas y furanos a temperaturas del orden de 800 °C con un tiempo de residencia de los gases resultantes en la cámara de combustión de 2 segundos garantiza su destrucción.

Es de relevancia resaltar que un error en la destrucción de estos compuestos durante el proceso de combustión, generará inevitablemente una descarga de estas sustancias a la atmósfera, también estarán presentes en las escorias resultantes, lo que facilitara su contacto con las personas. Esta distribución se muestra en la figura 1.

Figura 11. Distribución de dioxinas y furanos durante el proceso de combustión.



Fuente: Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001.

En la tabla 7 se relacionan los efectos de dioxinas y furanos sobre el organismo

Tabla 7. Efectos de dioxinas y furanos sobre el organismo.

EFECTOS DE DIOXINAS Y FURANOS SOBRE EL ORGANISMO.	
ÁREA AFECTADA	EFECTOS
Piel	Cloracné, hiperpigmentación, hiperqueratosis
Sistema nervioso	Neuropatías, disfunciones sexuales, neuritis
Cuerpo en general	Fibrosis hepática, problemas digestivos, dolores musculares, disfunciones en el sistema inmunológico.

Fuente: Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001.

1.5 COMBUSTION.

Se entiende por combustión, la combinación química violenta del oxígeno o comburente, con determinadas sustancias sólidas, líquidas o gaseosas llamadas combustibles, que se produce con notable desprendimiento de calor al que se le denomina calor de combustión o poder calorífico.

El oxígeno (O₂) se encuentra en el aire en un 21 % de su composición, también encontramos nitrógeno (N₂) en un 78% y el restante 1% son gases como argón (Ar), vapor de agua (H₂O), anhídrido carbónico (CO₂), etc.

Para que haya combustión se requieren tres factores: El combustible, el comburente y una energía de activación que promueva la reacción de combustión, generalmente esto se logra con una chispa, un fuego e incluso el incremento de la temperatura.

Para que se produzca la combustión, las condiciones ya nombradas deben cumplirse, es decir que sea: una combinación química, que sea violenta y que produzca desprendimiento de calor. A continuación se analiza cada condición:

Debe haber combinación química; los productos finales una vez producida la combustión, son químicamente distintos a los productos iniciales. Si tenemos combustible y oxígeno, y hacemos combustión no tenemos combustible y oxígeno mezclado, sino productos de combustión gases, sólidos y líquidos.

Los productos de combustión están constituidos principalmente por dióxido de carbono o anhídrido carbónico (CO₂) y vapor de agua (H₂O), las reacciones de combustión son en definitiva, reacciones rápidas de oxidación de los distintos componentes del combustible, fundamentalmente carbón (C), hidrógeno (H) y azufre (S).

1.5.1 Reacciones de combustión. Las reacciones de combustión pueden ser:

Completas: sin inquemados: $\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{Q}$

Estequiométricas: Con oxígeno justo: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{Q}$

Incompletas: con inquemados: $2\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2 + \text{Q}$

Con exceso de O₂ e inquemados

En la incineración, en particular en el horno, se pueden dar todas ellas a la vez.

Tabla 8. Reacciones químicas típicas de la combustión.

REACCIONES QUÍMICAS TÍPICAS DE COMBUSTIÓN		
Carbono (CO)	$C + O_2$	$CO_2 + Q$ (4000 BTU/Lb)
Carbono (CO_2)	$C + O_2$	$CO_2 + Q$ (14100 BTU /Lb)
Monóxido de carbono	$2CO + O_2$	$2CO_2 + Q$ (4345 BTU/Lb)
Hidrógeno	$2H_2 + O_2$	$2H_2O + Q$ (61100 BTU/Lb)
Azufre (SO_2)	$S + O_2$	$SO_2 + Q$ (3980 BTU/Lb)
Azufre (SO_3)	$2S + 3O_2$	$2SO_2 + Q$ (4100BTU/Lb)
Metano	$CH_4 + 2O_2$	$CO_2 + 2H_2O + Q$ (23875 BTU/Lb)
Acetileno	$2C_2H_2 + 5O_2$	$4CO_2 + 2H_2O + Q$ (21500 BTU/Lb)

Fuentes: Dispositivos y sistemas para el ahorro de energía, Pere Ezquerra Pizà, Marcombo S.A., 1988. Ingeniería de control de la contaminación del aire, NOEL DE NEVERS, Mc Graw Hill, 2000.

La tabla 8. Muestra las reacciones de combustión completa de los hidrocarburos. De estas reacciones se deduce el aire teórico o estequiométrico, es decir, la cantidad exacta de aire necesaria para suministrar el oxígeno preciso para una combustión completa.

La combinación química debe producirse violenta e instantáneamente. Si se deja una lámina de hierro a la intemperie, esta se va a oxidar lentamente, luego de cierto tiempo, al combinarse con el oxígeno del aire. Pero esto no es combustión sino oxidación, porque el desprendimiento de calor se produce muy lentamente después de un tiempo.

Debe haber un desprendimiento de calor, ya que todas las reacciones de combustión son exotérmicas.

En el proceso de combustión se pueden distinguir tres fases:

Una primera que se puede denominar de prerreacción o de formación de radicales. En ella se descomponen los combustibles para que puedan reaccionar sus

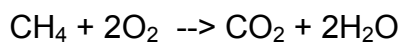
elementos (C) y (H) con el oxígeno, se forman así unos compuestos inestables intermedios llamados radicales.

La segunda fase, fuertemente exotérmica, tiene lugar con la oxidación por O₂.

La tercera fase es la que completa esta oxidación, dando ya lugar a componentes estables que son los gases de combustión.

Para realizar la combustión de una determinada cantidad de combustible se necesita una cantidad determinada de aire, por ejemplo para quemar 1 kg de gas natural se necesitan 17 kg de aire. Ahora bien si se utiliza justamente esa cantidad, se produce una combustión incompleta debido principalmente a problemas de contacto aire - combustible, y entonces en lugar de CO₂ se obtiene CO (monóxido de carbono) presente en los humos de chimenea e incluso puede quedar combustible sin consumir. Para prevenir esto es necesario suministrar un exceso de aire al quemador.

Un ejemplo que ilustra lo anterior es el siguiente. El gas natural es esencialmente metano CH₄, y su combustión se realiza por medio de la siguiente reacción:

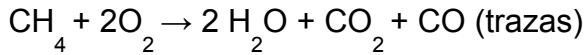


Estequiométricamente hablando un mol de metano (16 kg, según su peso molecular) se combina con dos moles de oxígeno (64 kg por peso molecular). Esos 64 kg de oxígeno son el 23% del peso de aire (21% en volumen de oxígeno equivale a 23% en peso), o sea que de aire se requieren 278 kg de aire, que para 1 kg de metano, corresponden a 17.4 kg. Si se considera un exceso del 15%, el anterior índice es de 20 kg de aire por kg de metano.

No obstante debe tenerse en cuenta que a mayor exceso de aire, mayores son las pérdidas de calor por los gases de chimenea, esto se debe a que se emplea cierta cantidad de calor para calentar el aire desde la temperatura ambiente 20°C por ejemplo, hasta la temperatura de los humos por ejemplo 210°C . Por tanto, es necesario utilizar el exceso de aire preciso para que la combustión sea completa, y no emplear más allá de la cuenta. El exceso óptimo de aire depende del

combustible utilizado, del tipo de caldera y quemador y de su estado y del tipo de control.

1.5.2 Eficacia de la combustión. El primer inquemado, y más común, es el CO.



Indica, suponiendo que la mezcla sea correcta, que:

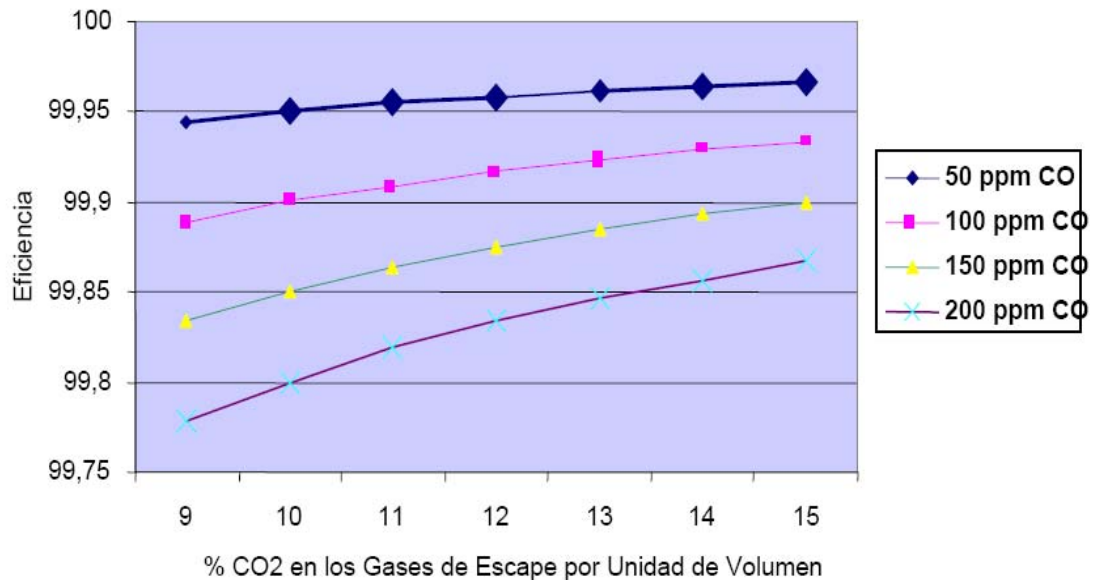
- Cuanto más C en el combustible, mayor potencial de formación de CO.
- La producción de CO disminuye con el exceso de aire.
- La producción de CO aumenta con la temperatura.

Se define la eficacia de la combustión (CE) como:

$$\text{CE} := 100 \cdot \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_2 + \text{CO}}$$

Una CE = 99% es un buen resultado técnico, transponiendo este valor a la ecuación anterior resulta CO = 0,08081 %, o sea 808 ppm de CO, valor inaceptable. La gráfica indica la evolución del CO en función de la CE.

Figura 12. Eficiencia Vs exceso de aire



Fuente: La incineración de residuos sólidos, inertes y peligrosos, Xavier Elías, Medellín, Julio de 2002

Normalmente para gas se utilizan excesos de no más del 10%. Para combustibles sólidos o líquidos pesados, como el presente caso, los excesos de aire no deben pasar del 30%.

1.5.3 El azufre en el proceso de la reducción catalítica (SCR). El caso de combustibles con alto porcentaje en azufre, durante su combustión se produce también SO_2 que puede ser catalíticamente oxidado a SO_3 . La oxidación del SO_3 puede reaccionar con el agua y el amoniaco no reaccionado (slip NH_3) para formar ácido sulfúrico y sulfato amónico.

Las sales de sulfato se pueden depositar y acumular sobre el catalizador dando lugar a su desactivación si la temperatura del catalizador no es suficientemente alta, y el ácido sulfúrico formado puede provocar problemas de corrosión aguas abajo en la planta. Por tanto, dependiendo de las condiciones de operación requeridas se debe disponer de un sistema catalítico de NO_x altamente selectivo para reducirlos con el NH_3 en presencia de O_2 , evitando todas las reacciones secundarias no deseables.

La reacción SCR tiene lugar a través de especies amonio fuertemente absorbidas, y con el NO desde la fase gas o débilmente adsorbido, pero difieren de forma sustancial en la naturaleza de las especies amonio reactivas adsorbidas: pudiendo estar como ión amonio protonado, o coordinado molecularmente.

1.5.3.1 Procesos SCR convencionales en la aplicación. En la tecnología SCR el catalizador es la parte fundamental del proceso, sin embargo las claves y criterios del proceso total vienen determinadas según los siguientes factores: conversión requerida de óxidos de nitrógeno, pérdida de carga, vida media del catalizador, coste y mínima capacidad de oxidación de SO_2 a SO_3 en el caso de combustibles con altos contenidos en azufre.

Tres tipos básicos de catalizadores han sido considerados para su uso comercial en los sistemas SCR: metales preciosos, operativos a temperaturas entre 175-

290°C, sistemas basados en metales de transición, los cuales operan entre 260-450°C y zeolitas, operativas a altas temperaturas. Los catalizadores a base de metales nobles (Pt y Pd/Rh) soportados sobre materiales de elevada área superficial, desarrollados por la industria automovilística en los años 70, son más efectivos o activos que los metales de transición, pero menos selectivos, debido a que presentan mayor tendencia a oxidar el amoníaco y el SO₂. Por ello, hoy en día, los sistemas comúnmente utilizados en los procesos SCR son los sistemas basados en óxidos metálicos. Esta fue la contribución más importante de la investigación japonesa en los años 70, pasando de sistemas basados en metales nobles a sistemas basados en óxidos metálicos. De este modo, catalizadores basados en óxidos de Cr, Cu, Fe y Vanadio no soportados o soportados sobre alúmina, sílica o dióxido de titanio han sido estudiados y se ha demostrado que son efectivos en la reducción de los óxidos de nitrógeno con amoníaco.

Los primeros catalizadores SCR se utilizaban en forma de pastillas o esferas y se empleaban en aplicaciones limpias o de bajo contenido en partículas (low dust). Actualmente, los catalizadores comerciales se utilizan en forma de monolitos cerámicos, con estructura de canales paralelos o metálicos con estructura laminar, debido a las grandes ventajas que presentan estos sistemas de flujo paralelo con respecto a los catalizadores convencionales como son la mayor superficie externa catalítica que presentan al contacto con los gases, la uniformidad del flujo de gases a su través y baja dispersión axial y finalmente minimizan la pérdida de carga permitiendo el tratamiento de elevados volúmenes de gas.

Los primeros sistemas de NO_x desarrollados para el proceso SCR fueron utilizados industrialmente en plantas de ácido nítrico y a continuación en centrales térmicas.

La presencia de altas concentraciones de NO₂ en las emisiones de las plantas de ácido nítrico (relación molar (NO₂/NO≈1), y la ausencia de SO_x y partículas en suspensión, permiten utilizar para esta aplicación catalizadores monolíticos basados en alúmina con una elevada densidad de celdas (> 30 celdas/cm²).

Sin embargo, la presencia de trazas de óxidos de azufre en los efluentes a tratar en las Centrales Térmicas convencionales que utilizan combustibles con

contenidos altos en azufre, ha obligado a prescindir de catalizadores soportados en alúmina u óxido de hierro ya que los óxidos de azufre pueden reaccionar fácilmente con estos soportes a las temperaturas de operación, 200-400°C, formando sulfato de aluminio o de hierro respectivamente, desactivando y destruyendo de este modo el catalizador.

Los catalizadores SCR instalados en las Centrales Térmicas, generalmente están constituidos por una mezcla homogénea de dióxido de titanio, pentóxido de vanadio y óxido de tungsteno (o trióxido de molybdeno). TiO_2 en forma de anatasa se utiliza como soporte de alta área superficial para soportar los componentes activos. El V_2O_5 es el responsable de la actividad del catalizador en la reducción de los óxidos de nitrógeno y de la oxidación no deseable del SO_2 a SO_3 también. Por tanto, el contenido del V_2O_5 se mantiene generalmente en valores bajos (alrededor de un 2 % en peso), reduciéndose alrededor del 1 % en peso en aplicaciones de alto contenido en azufre. El WO_3 se emplea en cantidades mayores, alrededor de un 10 % en peso, para aumentar la acidez del catalizador y limitar o inhibir la oxidación del SO_2 . El óxido de tungsteno también confiere al catalizador elevadas propiedades mecánicas y superior estabilidad térmica. También se utilizan silicoaluminatos y fibras de vidrio como aditivos cerámicos o aglomerantes inorgánicos para conferir mayor resistencia mecánica al catalizador final.

1.6 COMBUSTIBLES.

Todos los combustibles tienen algo en común, ese factor común son dos elementos químicos, el carbono y el hidrógeno.

Existen dos grandes ramas de la química: la química inorgánica y la orgánica. La primera trata todos los elementos puros y los compuestos de origen mineral, mientras que la segunda se ocupa de los compuestos orgánicos, llamados originalmente orgánicos porque se los asociaba con distintas formas de vida, hoy día un plástico es un compuesto estudiado por la química orgánica y, sin embargo, no está asociado a ninguna forma original de vida.

En realidad la química orgánica se ocupa de los compuestos que tienen como base al carbono y al hidrógeno, combinados de tal manera que forman complejas cadenas y estructuras moleculares muchas veces conteniendo también otros elementos, pero básicamente constituidos por carbono e hidrógeno, y aquí radica la clave de un combustible.

Cuando el carbono y el hidrógeno se mezclan con el oxígeno en presencia de alguna fuente de calor que inicie la reacción, se combinan químicamente generando un fuerte desprendimiento de calor, con formación de anhídrido carbónico (CO_2) y agua (H_2O), principalmente. En la realidad se forman varios compuestos más, pero por ahora consideramos una combustión ideal o perfecta.

El hidrógeno es un elemento que en la naturaleza difícilmente se encuentra libre, casi siempre está combinado, principalmente con carbono (compuestos orgánicos) y con oxígeno (agua). Es un gas sin color ni olor y tiene la propiedad de ser sumamente liviano.

El oxígeno es más pesado, por lo que es el que más tendencia tiene a estar cerca de la tierra. El resultado de la combustión será anhídrido carbónico (CO_2), este es un gas no activo. El combustible genera calor en su combustión y otros subproductos. Ese calor mediante una maquinaria adecuada se transforma en otras formas de energía como el movimiento controlado.

Son tres las principales variables que inciden y determinan los procesos de combustión, que se conocen como las tres Tes de la combustión: temperatura, tiempo y turbulencia.

1.6.1 Poder calorífico. La propiedad del combustible, quizás la más importante, que se emplea para medir la cantidad de calor desarrollada en la combustión se denomina poder calorífico.

Se entiende por poder calorífico de un combustible, la cantidad de calor producida por la combustión completa de un kilogramo de esa sustancia. Se mide en unidades de energía por unidades de peso o masa de combustible, por ejemplo cal/kg, J/kg, BTU/lb, etc.

El poder calorífico puede expresarse como: poder calorífico superior (N_s) o como poder calorífico inferior (N_i), dependiendo si el agua producto de la combustión y la que tenía originalmente el combustible, se encuentra en estado líquido en el primer caso o en estado gaseoso en el segundo.

1.6.2 Clasificación y especificaciones de los combustibles industriales.

1.6.2.1 Combustibles sólidos. El proceso de combustión de estos combustibles difiere bastante con respecto a los combustibles líquidos y los gaseosos.

La buena o mala combustión del sólido depende de la facilidad del acceso del aire a las diversas partículas del combustible. Estas deben estar distribuidas uniformemente sobre la superficie de combustión, no se debe encontrar amontonado o agolpado. El proceso de combustión de un sólido está dividido en cuatro períodos o fases a saber:

A.) Secado del combustible: Al comenzar a recibir calor, el combustible se seca, evaporando la humedad que posee, convirtiéndose en vapor de agua.

B.) La destilación o pirolisis: Comienza cuando se ha evaporado toda la humedad del combustible. Este se compone de hidrocarburos más simples, comenzando a quemar los más volátiles (requieren menor temperatura de inflamación).

C.) Al aumentar la temperatura debido a la combustión de los primeros hidrocarburos que queman se alcanzan las condiciones para que se quemen los hidrocarburos menos volátiles (casi todos los componentes activos del combustible), finalmente se quema el material sólido residual.

D) Quemadas todas las sustancias volátiles y sólidas, la llama se apaga. Quedando las cenizas del sólido, considerándose como escoria y conformada por compuestos inactivos e inertes de la combustión.

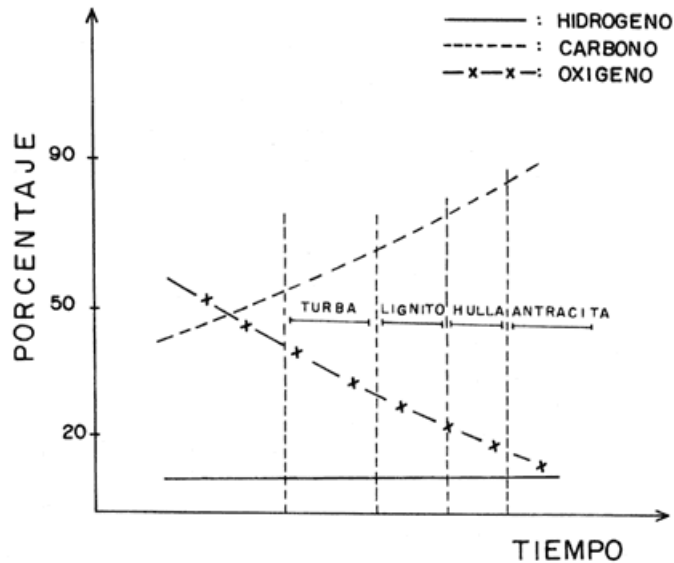
A continuación mencionaremos algunos ejemplos de combustibles sólidos.

Madera: utilizada como combustible en zonas rurales, en Colombia su utilización es muy común, (poder calorífico hasta 8000Btu/lb. secos).

Carbones fósiles: cuanto más antiguo son los restos orgánicos y mayores presiones soportan, mayor es el rango del carbón.

Hulla: son los carbones más utilizados en la industria, se distinguen tres tipos: hulla seca, hulla grasa y la hulla magra

Figura 13. Variación de los porcentajes de carbono, oxígeno e hidrógeno durante la formación de los distintos carbones naturales



Fuente: http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/139/htm/sec_9.htm

1.6.2.1.1 Carbón lignítico. Lignito se forma una vez comprimida la turba, es una variedad de carbón fósil mineral, de color negro o pardo y estructura fibrosa o leñosa, poco compacto, de calidad intermedia entre el carbón de turba y el bituminoso. Desde el punto de vista geológico, el lignito es de origen reciente pues se encuentra en los estratos del cretácico y del terciario; del lignito se obtienen hidrocarburos equivalentes a los componentes del petróleo.

Tiene una capacidad calorífica inferior a la del carbón común debido al gran contenido de agua 43,4%, un bajo porcentaje de carbono fijo de 55 a 75%, oxígeno de 19 a 26%, hidrógeno de 6 a 3%, el alto contenido de materia volátil 18,8% provoca la desintegración rápida del lignito expuesto al aire. El lignito tiene un poder calorífico de 10000btu/lb.

1.6.2.1.2 Carbón sub-bituminoso. La formación del carbón sub-bituminoso (lignito negro) de tipo liviano pertenece a la era terciaria y es un carbón blando con un

contenido medio de carbono y bajo contenido de sulfuro, se caracteriza por ser húmedo y tener un alto contenido en volátiles y un poder calorífico moderado de 7200btu/lb y 10250btu/lb, por lo que es utilizado en la producción de gases de combustión para generar vapor de agua en calderas, cuyo consumo se concentra en la generación eléctrica y la industria.

1.6.2.1.3 Carbón semibituminosos. El carbón semibituminosos es de color negro opaco, con baja proporción en materias volátiles y poder calorífico de 14,500btu/lb; razón por la que ocupa una posición intermedia junto con los bituminosos y subbituminos entre los diferentes tipos de carbón.

Por sus características es apto para coquificar y utilizar en la generación de energía eléctrica.

1.5.2.1.4 Carbón bituminoso. El término bituminoso se refiere al grado de poder calorífico que tiene el carbón, cuya constitución y propiedades son intermedias entre la antracita y el lignito, que procede del periodo carbonífero (hace unos 250 millones de años), y suele tener color negro brillante y presenta estructura laminar.

El carbón bituminoso tiene un porcentaje de carbono fijo de 69 a 86%, y un poder calorífico de (15300btu/lb).

Clasificación del carbón bituminoso por grado:

- Bituminoso bajo en volátiles (Bbv)
- Bituminoso medio en volátiles (Bmv)
- Tipo A alto en material volátil
- Tipo B alto en material volátil
- Tipo C alto en material volátil

De esta variedad de carbón bituminoso depende la cantidad de formación de gas metano

1.6.2.1.5 Antracita. La antracita es un carbón duro de alta calidad, que se formó principalmente hacia el final del periodo carbonífero, es de color negro con brillo vítreo de estructura cristalina y una fractura concoidea, con el mayor contenido de carbono fijo y el menor contenido de material volátil de todos los tipos de carbón. Contiene aproximadamente un 87,1% de carbono, un 9,3% de cenizas y un 3,6% de materia volátil, este tipo de carbón es el de mayor poder calorífico 15700btu/lb, libera una gran cantidad de energía al quemarse y desprende poco humo y hollín, se utiliza para la calefacción y la producción de electricidad en centrales termoeléctricas.

Hulla seca: hornos de arrabio y en la producción de coque metalúrgico. ($N_S = 13500\text{btu/lb.}$)

Hulla grasa: en la producción de gas alumbrado y coque. ($N_S = 8300$ a 15000btu/lb)

Hulla magra: desprende pocas materias volátiles. ($N_S = 14200$ a 15100btu/lb.)

Antracita: son los carbones más antiguos. Tienen gran contenido de carbono y pocos materiales volátiles y oxígeno. ($N_S = 14050$ a 15700btu/lb.)

Lignito: son combustibles que proceden de la carbonización natural de la madera. Al quemarse desprende el azufre provocando mal olor y daños en metales y estructuras. Hay dos tipos distintos:

Lignitos perfectos: más antiguos (poder calorífico = 10800btu/lb.)

Lignitos leñosos: más jóvenes. (Poder calorífico = 9000 a 10300btu/lb.)

Turba: La turba corresponde al primer estado de descomposición del material vegetal. ($N_S = 5760$ a 7200btu/lb.), solo puede utilizarse previo secado.

Carbón vegetal o de leña: provienen de la carbonización de la madera. ($N_S = 10800$ a 12600btu/lb.), contiene normalmente poco azufre.

1.6.2.1.6 Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Se entiende por (RSU) como los generados en las casas habitacionales, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que

genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la Ley como residuos de otra índole.

Para la legislación ambiental colombiana, un residuo sólido urbano (RSU) es "cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización o control de calidad, que no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó".

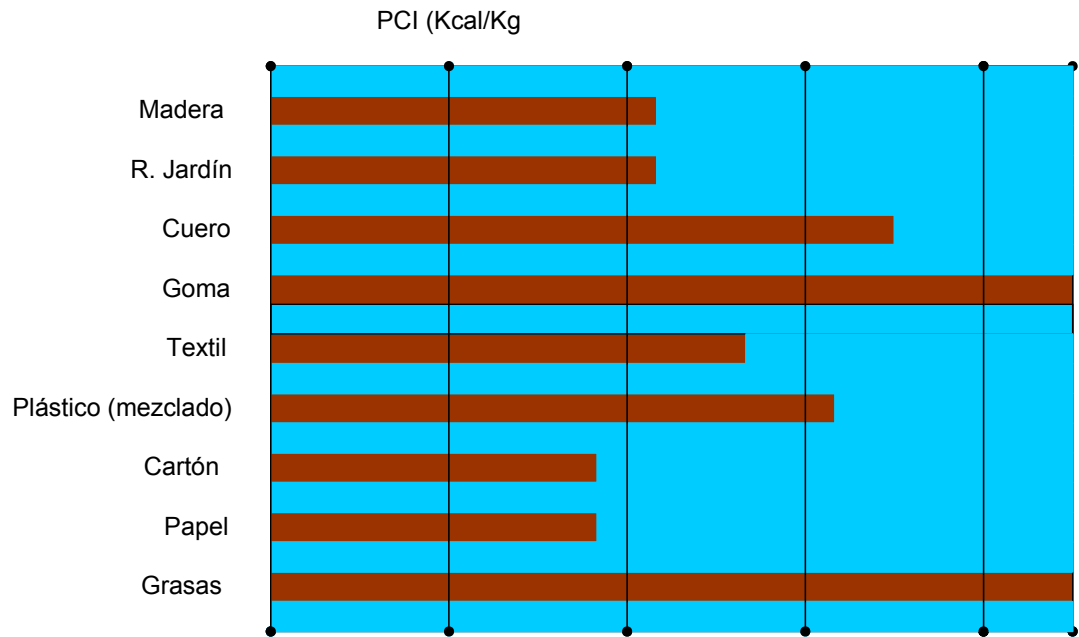
Los residuos sólidos plásticos (RSP), forman parte de los residuos sólidos urbanos (RSU), que se generan en casas, comercios, instituciones y áreas públicas. La creciente escasez de materias primas para la síntesis de plásticos, su recuperación y la protección del ambiente, son razones suficientes para su reciclaje.

En los países desarrollados, las estrategias de manejo y aprovechamiento de RSP, se emplean para generar energía eléctrica por incineración. En contraste en países en vías de desarrollo como Colombia, no existe conciencia para su uso, aunado al desinterés, la ignorancia por el reciclaje de los residuos sólidos, los convierte en basura, a pesar del actual avance tecnológico al respecto.

1.6.2.1.7 Productos de Combustión Incompleta (PCI) de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). A partir del análisis elemental de los diversos compuestos se puede aplicar la fórmula de Dulong modificada para hallar el PCI.

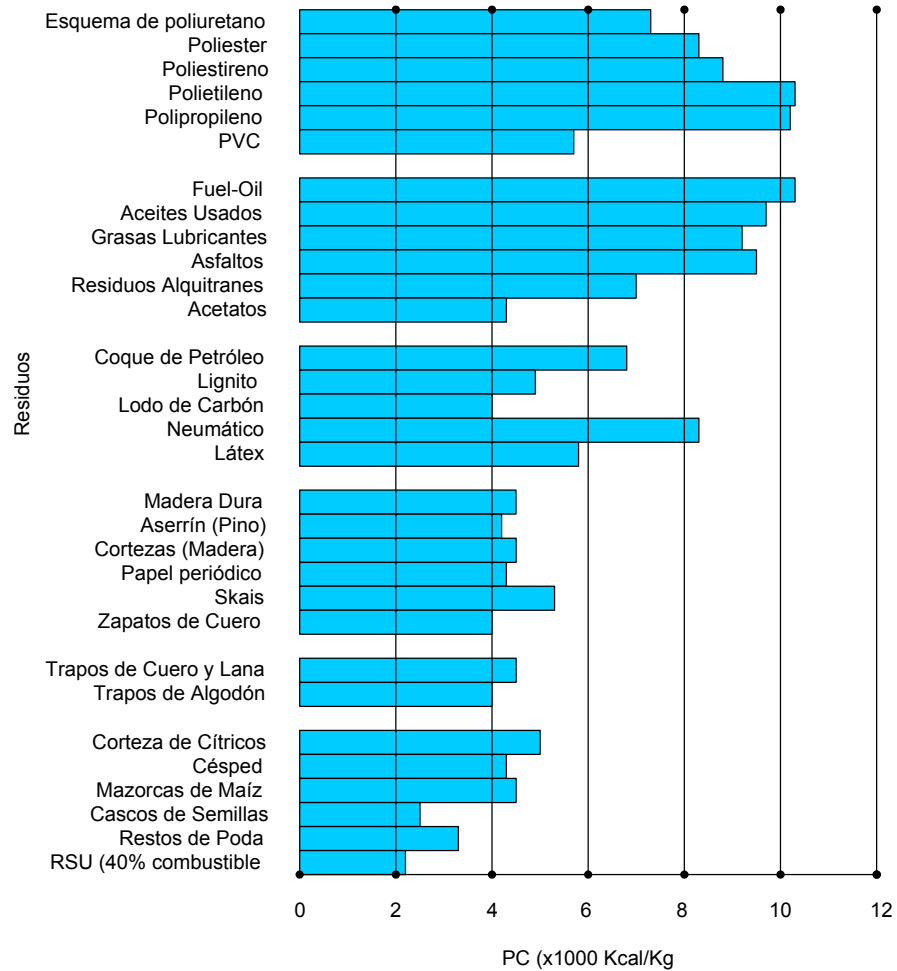
$$PCI = 8.060 * C + 33.910 * (H - 1/8O) + 2.222 * S + 556 * N$$

Figura 14. Muestra el PCI de los principales componentes del RSU.



Fuente: La incineración de residuos sólidos inertes y peligrosos, Xavier Elías, Medellín, Julio 2002

Figura 15. Muestra los residuos como combustibles en PC (x1000kcal/Kg)



Fuente: La incineración de residuos sólidos inertes y peligrosos, Xavier Elías, Medellín, Julio 2002

1.6.2.1.8 Características de algunos combustibles alternativos. Desde el punto de vista del “Waste to energy” lo mas destacable es el productos de combustión incompleta (PCI), la cantidad de inertes/cenizas y los contaminantes que incorporan. La tabla siguiente muestra los parámetros (valores medios) mas representativos para una serie de combustibles residuales.

Tabla 9. Parámetros (valores medios) mas representativos para una serie de combustibles residuales.

Residuos	Paja	Madera	Fango EDAR	Plástico	Carbón
Cenizas (%)	4	1.5			12
C (%)	42	50	27.1	82	59
H (%)	5	6	4.6	14	3.5
O (%)	37	43			7.3
Cl (%)	0.6	0.02			0.08
N (%)	0.4	0.3	3.0		1.0
S (%)	0.15	0.05	2.2		0.8
PCI (Btu/lb)	7524	8010	4464	17640	13248

Fuente: La Incineración de Residuos Sólidos, Inertes y Peligrosos, Xavier Elías, Medellín, julio de 2002.

Tabla 10. Parámetros (valores medios) mas representativos para una serie de combustibles residuales.

Residuos	Madera Reutilizable	RSU Seleccionados	Residuos Agrícolas
Celulosa (%)	50	45	38
Hemicelulosa (%)	23	9	32
Lignina (%)	22	10	17
Extractivos (%)	5		
Compuestos C (%)		9	
Otros (%)		12	13
Cenizas (%)		15	

Fuente: La Incineración de Residuos Sólidos, Inertes y Peligrosos, Xavier Elías, Medellín, julio de 2002

1.6.2.2 Combustibles líquidos. Al calentar un combustible líquido, se presenta un período de vaporización y destilación en el cual el líquido si no es puro se

descompone en diversos componentes volátiles. Se deben distinguir dos casos según la forma en que se queman. Si son suficientemente volátiles para que al calentarse emitan vapores en suficiente cantidad como para continuar ardiendo, se comporta como un combustible gaseoso.

En cambio, en los líquidos menos volátiles no es necesario efectuar una vaporización para que se produzca la combustión. En tal caso se forma una mezcla de aire y combustible, conservándose éste último en estado líquido todavía, aunque finalmente pulverizado, constituyendo una mezcla carbónica, como la producida en un motor de combustión interna.

Flash point, es aquel punto para el cual el líquido desprende materias volátiles inflamables. Los combustibles líquidos presentan, en general, mejores condiciones que los sólidos para entrar en combustión pues son sustancias que se obtienen por destilación, del petróleo crudo o de la hulla, compuestos que al ser sometidos a procesos térmicos pueden dar lugar a diversidad de productos derivados más homogéneos.

Clasificación de los combustibles líquidos, establecido por decreto 278 expedido 1982

- Clase I: Combustibles con punto de inflamación menor a 37,8 °C. Gasolina y Gasolina de aviación
- Clase II: Combustibles con punto de inflamación igual o superior a 37,8 °C y menor que 60 °C. Kerosene de Aviación (JP-1), petróleo diesel, fuel oil N° 5 o también llamado Combustóleo en Colombia.
- Clase III: Combustibles con punto de inflamación entre 60 °C y 93,4 °C. fuel oil N° 6 o también llamado Combustóleo en Colombia.
- Clase IV: Combustibles con punto de inflamación superior a 93,4 °C

Se denomina punto de inflamación cuando la temperatura a la cual el combustible al ser calentado por un foco exterior, comienza a presentar una llama corta.

Se le dice punto de combustión, a la temperatura a la cual el combustible es capaz de proseguir por si solo la combustión, una vez que ésta se ha iniciado en un punto de su masa, esta se produce por encima del punto de inflamación.

Se señala como punto de inflamación espontáneo, a la temperatura a la cual el combustible es capaz de entrar por si solo en combustión, sin necesidad de un foco exterior que la produzca. Este punto depende de la presión de vapor del líquido.

1.6.2.3 Combustibles líquidos artificiales. El petróleo, se formó desde épocas muy remotas. Su origen responde a restos fósiles, depositados en las profundidades. Los petróleos están constituidos por distintos hidrocarburos, de distintos grados de densidad y volatilidad. La diversidad en las proporciones de los elementos que los componen, hace que difieran fundamentalmente las características del petróleo obtenido en un lugar con respecto al obtenido en otro.

Los diversos subproductos obtenidos, tanto en la destilación primaria como en la secundaria, son sometidos a procesos de refinación, con el objeto de eliminar los componentes indeseables y nocivos que puedan contener. El petróleo en estado crudo tiene muy poco uso como combustible, pues desprende vapores sumamente inflamables. Gracias al proceso de destilación al que se somete el petróleo se obtiene una gran diversidad de subproductos, a continuación mencionaremos los principales junto con el uso al que se destinan.

1.6.2.4 Combustibles gaseosos. En el estado gaseoso los combustibles brindan una eficiente combustión. La facilidad de acceso del aire a las diversas partículas del combustible, hace que la propagación se efectúe en forma rápida. Si la presión o la temperatura, alcanzan un valor por arriba de un límite determinado, la propagación adquiere valores muy grandes y deja de ser una explosión para ser una detonación, en la cual la velocidad de la reacción química que se produce es

mucho mayor. El punto de inflamación de una mezcla esta dado por la temperatura, en la tabla 11 se muestra algunos ejemplos.

Tabla 11. Temperatura para punto de inflamación.

TEMPERATURA PARA PUNTO DE INFLAMACIÓN.	
MEZCLA	TEMPERATURA
Acetileno	425 °C
Metano	700 °C
Hidrógeno	585 °C
Óxido de carbono (CO)	650 °C

Fuente <http://www.wikipedia.org>

A continuación se enuncian algunos ejemplos de combustibles gaseosos.

El gas natural, es el que se obtiene directamente de los yacimientos de gas. Si en el yacimiento hay hidrocarburos líquidos, generalmente se denomina gas natural húmedo, pero si no los hay se llama gas natural seco. En los yacimientos petrolíferos este gas se usaba comúnmente para empujar al petróleo a la superficie. Su uso actual se ha ampliado y masificado. Su poder calorífico es de 1.1 btu/ft³.

- Gas de alumbrado: Se denomina también gas de hulla. Se obtiene de la combustión incompleta de la hulla. Por cada 220.46lb de carbón que se carbonizan, se obtienen de 1060.10ft³ a 1236.75ft³ de gas de alumbrado. Es un excelente combustible, usado principalmente para usos domésticos y para pequeños hornos industriales. Su precio es elevado. En el país solo se produce en Paz del Río, y se consume ahí mismo. Su poder calorífico es de entre 0.5 btu/ft³ y 0.6btu/ft³.
- Acetileno: Se obtiene del tratamiento del carburo de calcio con agua. Es un excelente combustible. Su poder calorífico es superior a 2.02 btu/ft³.

- Gas de agua: Se obtiene haciendo pasar vapor de agua a través de una masa de carbón de coque incandescente. Su poder calorífico es de $0.27\text{btu}/\text{ft}^3$. no es utilizado actualmente.
- Gas de aire: Se lo obtiene haciendo pasar aire por un manto de hulla o lignito incandescente de gran espesor. Su poder calorífico es de $0.12\text{ btu}/\text{ft}^3$. Éste es un proceso antiguo de gasificación de carbón.

Gas pobre o mixto: se obtiene haciendo pasar una corriente de aire húmedo, es decir, una mezcla de aire y vapor de agua a través de una masa de gran espesor de hulla o lignito incandescente. La mezcla de vapor de agua y aire, quema parcialmente, produciendo cantidades variables de óxido de carbono e hidrógeno, estas sustancias van a constituir los elementos activos del gas mixto. Tiene un poder calorífico de entre $0.13\text{btu}/\text{ft}^3$ y $0.17\text{btu}/\text{ft}^3$. Éste es un proceso antiguo de gasificación de carbón.

Gas de altos hornos: Se obtiene de los hornos de fundición. Al cargar un alto horno con mineral para obtener arrabio (hierro), se desprende una serie de gases que salen parcialmente quemados y pueden ser posteriormente utilizados en la misma planta industrial como combustible. Se utilizan principalmente para la calefacción o para la producción de fuerza motriz. Su poder calorífico es de $0.10\text{ btu}/\text{ft}^3$.

1.6.2.4.1 Metano. El metano CH_4 es un gas de invernadero, que se produce por la descomposición de sustancias vegetales, principalmente celulosa, por la acción de microorganismos, y se desprende del cieno de algunos pantanos, por lo que también suele denominarse gas de los pantanos. El metano se desprende también, más o menos puro, de los volcanes de fango y de algunas aguas y fuentes no cenagosas.

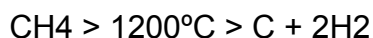
Se produce asimismo en las minas de carbón de piedra y de lignito, por descomposición lenta de las materias orgánicas, acumulándose en las hendeduras y cavidades mezclado con nitrógeno y anhídrido carbónico. Asimismo por formar

parte del petróleo y del gas natural se encuentra en todos aquellos lugares ricos en dichos compuestos.

Obtención: el petróleo, al igual que el gas natural que le acompaña en bolsas, constituye la principal fuente de alcanos hasta el C40, así como de otras sustancias orgánicas.

El petróleo crudo carece de utilidad comercial, pero por destilación pueden separarse de él multitud de productos útiles, denominados fracciones. El metano se desprende, al igual que otros hidrocarburos como el etano, el propano y el butano, en la primera fracción de la destilación del petróleo, consistente en calentarlo por debajo de los 20°C.

El Gas Natural está compuesto por hidrocarburos muy bajos, desde C1 a C8 aproximadamente. Los porcentajes máximos corresponden a los más volátiles. Así al metano suele corresponderle un 80% de la mezcla. El propano y butano se separan por licuefacción. Aunque una buena parte de él se utiliza en la fabricación de *negro de humo* siguiendo un procedimiento de pirólisis:



Procedimientos:

Sintéticos Proceso Bergius: se hidrogena carbón en presencia de catalizadores a altas temperaturas y presiones.

Proceso Fischer-Tropsch: se parte de gas de agua enriquecido con hidrógeno y se le hace pasar por un catalizador en caliente.

Destilación Seca: de esta forma se obtiene metano de muchas sustancias orgánicas, como la madera, turba, hulla, rocas bituminosas, etc.

Síntesis Directa: se hace actuar el hidrógeno sobre el carbono a 1200°C.

Propiedades Físicas: el punto de fusión y el punto de ebullición en los hidrocarburos dependen de la longitud de la cadena, debido a las fuerzas de Van

Der Waals. Para moléculas tan pequeñas, estas fuerzas atractivas son muy débiles, debido a esto, el metano es el hidrocarburo más sencillo.

Tabla 12. Características Físico – Químicas del Metano.

Características Físico – Químicas del Metano	
Peso molecular	16
Temperatura de fusión	-182°C
Temperatura de ebullición	-161°C
Temperatura crítica	-82°C
Densidad relativa del gas (aire=1)	0.6
Densidad relativa del líquido (agua=1)	0.42
Presión de vapor a 20°C	No aplicable.
Solubilidad en agua (mg/l)	26mg/l
Apariencia y color	Gas incoloro
Calor de combustión	845.24btu/l

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Metano>

Su estado natural es gaseoso, al igual que el etano, el propano y el butano; y a diferencia de los alcanos desde C5 hasta C16 que son líquidos; de ahí en adelante son sólidos de aspecto céreo.

Al ser un compuesto prácticamente no polar resulta insoluble en agua, pero sí en disolventes apolares como el benceno, éter, alcohol, tetracloruro de carbono, etc.

Propiedades Químicas: la mínima polaridad de los enlaces de los hidrocarburos saturados es la causa de su inercia química, razón por la cual han sido llamados *parafinas* (poca afinidad). Únicamente dan reacciones de *tipo radical*, generalmente de sustitución.

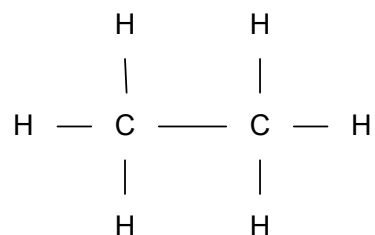
Halogenación: si se expone una mezcla de cloro y metano a la luz solar se produce una reacción muy violenta. La luz violeta o ultravioleta escinde la molécula Cl₂ en 2Cl, que son las que inician la reacción en cadena.

Pirólisis o Craqueo: es la descomposición de un compuesto por el calor. Cuando se calienta el metano a unos 600°C en ausencia de aire tienen lugar rupturas de las uniones C-H.

Nitración: se realiza la reacción con ácido nítrico en fase de vapor a temperaturas superiores a 400°C, produciéndose la sustitución de un hidrógeno del alcano por un grupo nitro.

Combustión: si se aporta energía suficiente para iniciar la reacción, todos los alcanos arden en aire u oxígeno formando agua y anhídrido carbónico, desprendiendo gran cantidad de calor. La oxidación controlada de hidrocarburos constituye un método industrial de obtención de alcoholes y ácidos orgánicos.

1.6.2.4.2 Etano. El etano es un hidrocarburo alifático alcano con dos átomos de carbono. Su forma química es (C₂H₆) O bien:



Es un gas a temperatura ambiente y un excelente combustible. Su punto de ebullición está en -88.6°C.

Se encuentra en cantidad apreciable en el gas natural, pero también se puede obtener de la caña de azúcar

El etano se utiliza de dos maneras diferentes:

- como mezcla con la gasolina, compuesto del 22% de etano anhidro, a 99,6 Gay-Lussac (GL) y 0,4 % de agua, formando una mezcla de "gasohol" con el objetivo de un aumento del octanaje de la gasolina;
- como etano puro, compuesto de etano hidratado, a 95,5 GL.

El etano es un excelente combustible automotriz: presenta un índice de octanaje superior al de la gasolina y tiene una presión de vapor inferior, resultando en menores emisiones evaporativas. La combustión en el aire es inferior a la de la gasolina, lo que reduce el número y la importancia de los incendios en los vehículos. El etano anhidro tiene un poder calorífero entre 21,2 y 23,4 mega joules por litro, respectivamente, contra 30,1 y 34,9 mega joules por litro de gasolina.

En Brasil las propiedades del etano (como combustible) llevaron al desarrollo de motores a alcohol y motores para la mezcla alcohol/gasolina. Hasta 1988, los avances se realizaron por la industria automovilística (GM, Ford, Volkswagen, Fiat) para sistemas carburados; actualmente, se encuentran disponibles para todos los motores con sistemas a inyección electrónica. En la Tabla se indican las principales propiedades del alcohol.

Tabla 13. Propiedades y características del etano.

Características Físico – Químicas del Etano	
Calor específico (btu/lb)	11478
Número de octanaje (RON/MON)*	109/98
Calor latente de vaporización (btu/lb)	388
Temperatura de ignición (°C)	420
Razón estequiométrica Aire/Combustible	9
Peso molecular	30
Temperatura de fusión	-183 °C
Temperatura de ebullición	-88.6 °C
Temperatura crítica	32 °C
Densidad relativa del gas (aire=1)	1
Densidad relativa del líquido (agua=1)	0.54
Presión de vapor a 20°C	37.8 bar
Solubilidad en agua (mg/l)	61 mg/l
Apariencia y color	Líquido incoloro
Olor	Ninguno
Temperatura de auto ignición	515 °C
Calor de combustión	- 1479.36 Btu/mol.

*RON - research octane number MON - motor octane number

Fuente: http://www.mct.gov.br/clima/espan/comunic_old/alcohol3.htm

1.6.2.4.3 Propano. El propano de fórmula (C₃H₈) es un gas inflamable incoloro e inodoro de los alcanos de los hidrocarburos.

Se obtiene en yacimientos subterráneos de petróleo crudo, gas natural y como producto derivado del refinado del petróleo. Una vez extraído el crudo se procede a un tratamiento de refino para obtener los distintos productos que provienen de este

aceite, entre ellos el gas propano, butano, y etano. El propano es una fuente de obtención del propano y etileno.

El propano no reacciona vigorosamente a temperatura ambiente, pero a temperaturas más altas, el propano arde en contacto con el aire, produciendo dióxido de carbono y agua.

El propano se utiliza como combustible para motores, en hogares, como refrigerante, como disolvente a baja temperatura.

Tabla No. 14 Características Físico – Químicas del Propano.

Características Físico – Químicas del Propano	
El poder calorífico superior (PCS)	21420 btu/lb.
El punto de fusión del propano	-189,9°C
El punto de ebullición	-42,1°C.
Masa molecular	44.1
Densidad relativa (agua = 1)	0.5
Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C	0.007
Presión de vapor, kPa a 20°C	840
Densidad relativa de vapor (aire = 1)	1.6
Temperatura crítica	39°C
Punto de inflamación	-104°C
Temperatura de autoignición	450°C
Límites de explosividad, % en volumen en el aire	2.1-9.5
Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow	2.36
Energía mínima de ignición	23695.5btu

Fuente: <http://www.mtas.es/insh/ipsnspn/nspn0319.htm>

1.6.2.4.4 Butano. El butano es un hidrocarburo livianos saturado, parafínico o alifático, inflamable, gaseoso que se licua a presión atmosférica a -0,5 grados centígrados, formado por cuatro átomos de carbono y por diez de hidrógeno, cuya fórmula química es C₄H₁₀. El butano presenta dos isómeros el normalbutano y el isobutano o metilpropano en una proporción superior al 90% en volumen líquido. A condiciones normales es gaseoso y al comprimirlo pasa a estado líquido, poseen una baja reactividad química a temperatura normal, pero arden con facilidad al quemarse en el aire o con oxígeno.

Se usa en síntesis orgánica, como materia prima para el caucho sintético y en combustibles líquidos de alto octanaje, en elaboración de etileno, como solvente, refrigerante, propulsor de aerosoles y aditivo en alimentos. El butano comercial es un gas licuado, obtenido por destilación del petróleo, compuesto principalmente por butano normal (60%), propano (9%), isobutano (30%) y etano (1%). Constituyen el componente más volátil de la gasolina.

La principal aplicación del gas butano es la de combustible en hogares para la cocina y agua caliente, y en los mecheros de gas.

Tabla 15. Características Físico – Químicas del Butano.

Características Físico – Químicas del Butano.	
Punto De Ebullición (760 mm Hg)	-50°C
Presión Del Vapor (20°C)	2 atm a 18.8°C
Gravedad Específica	0.599 a 0°C
Punto De Congelación	-138.3°C
Densidad Del Vapor (aire = 1)	2.046
Punto De Inflamación (método utilizado)	-60°C
Punto De Auto ignición	405°C
Gravedad específica a 70 °F (21°C), 1 atm(aire = 1)	2.007
Poder calorífico superior (PCS)	21236 btu/lb

Fuente: ECOPETROL, catálogo de productos

- Nafta: Es un combustible altamente volátil, muy inflamable y es utilizado, sobre todo, como combustible para motores a explosión. Su poder calorífico es 19798btu/lb. Es la base de las gasolinas para motor.
- Kerosene: Constituye un derivado menos volátil e inflamable que la nafta. Su poder calorífico es de 18896btu/lb. Se utiliza en calefacción y en las turbohélices y reactores de las turbina de gas de los motores de aviación.
- Gas-oil: es denso, menos volátil que el petróleo. Su poder calorífico es igual a 18446btu/lb. Se utiliza mucho en calefacción y para hornos industriales y metalúrgicos.
- Diesel-oil: es un subproducto obtenido de los derivados más pesados del petróleo. Se quema más lentamente que el gas-oil. Se utiliza sólo en motores Diesel lentos en los cuales el combustible dispone más tiempo para quemar. Su poder calorífico es de 19796btu/lb.
- Fuel-oil: es un subproducto obtenido de los derivados más pesados del petróleo. Se quema con dificultad. Su poder calorífico es igual a 18000btu/lb.

1.6.2.5 Otros productos combustibles

- Alquitrán de hulla: es un subproducto obtenido de la fabricación del coque. Puede quemar directamente pero poco se le utiliza como combustible, usándolo sólo en hogares especiales, que puedan vencer la viscosidad del mismo. Su poder calorífico es de 16377btu/lb. se usó para la producción de inmunizantes de madera y desinfectantes, hoy no se produce por razones ambientales, su combustión parcial genera compuestos cancerogénicos.
- Alquitrán de lignito: se obtiene de la destilación del lignito. Su poder calorífico es 17277btu/lb. Es muy similar al gas-oil, pero al utilizarlo en motores diesel, su comportamiento es muy inferior al de los derivados del petróleo. En otros equipos se tiene un excelente comportamiento.
- Alcoholes: pueden quemar muy fácilmente. Tienen diversos orígenes (petróleo, frutas, tubérculos, etc.). Los alcoholes puros, como combustibles tienen muy

poco uso. Su mayor empleo está en la fabricación de mezclas con benzol, bencina o naftas con objeto de mejorar la calidad de las mismas.

1.6.3 API y gravedad específica o densidad. Una escala arbitraria que expresa la gravedad o la densidad de los productos de petróleo líquidos. La escala que mide está calibrada en términos de los grados API. Puede ser calculado en función de la siguiente fórmula:

$$\frac{141.5}{Gravedad\ 15.56^{\circ}C} - 131.5$$

Esto aplica solo para líquidos derivados del petróleo.

1.6.4 Viscosidad. Viscosidad, propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. Los fluidos de alta viscosidad presentan una cierta resistencia a fluir; los fluidos de baja viscosidad fluyen con facilidad. La fuerza con la que una capa de fluido en movimiento arrastra consigo a las capas adyacentes de fluido determina su viscosidad, que se mide con un recipiente (viscosímetro) que tiene un orificio de tamaño conocido en el fondo. La velocidad con la que el fluido sale por el orificio es una medida de su viscosidad.

1.6.5 Contenido de calor o capacidad calorífica. La capacidad calorífica de una sustancia se refiere a la energía necesaria para aumentar en un grado la temperatura de un cuerpo. Sus unidades son J/°K cal/°C. Si un cuerpo intercambia cierta cantidad de energía térmica Q y se produce un incremento de temperatura ΔT, la relación entre ambas magnitudes es, $Q = C \cdot \Delta T$. Donde C es la capacidad calorífica del cuerpo.

Aumentar o disminuir la temperatura de un gas encerrado en un recipiente se puede realizar a volumen o a presión constante, por lo que en el caso de las sustancias gaseosas se habla de capacidad calorífica a volumen constante, Cv, y de capacidad calorífica a presión constante, Cp.

La capacidad calorífica de un cuerpo es proporcional a la cantidad de masa presente, $C = m \cdot c$. La constante c se denomina capacidad calorífica específica o más comúnmente, calor específico y sólo depende del tipo de sustancia de que se trate, pero no de su cantidad. Es la energía necesaria para elevar en un grado la temperatura de un kilogramo de una sustancia.

El área de la ciencia encargada del estudio de la energía y sus transformaciones es la Termodinámica, y cuando dichos cambios involucran reacciones químicas es la Termodinámica química, llamada a veces termoquímica, se le dio este nombre en la revolución industrial cuando se estudiaron las relaciones entre calor, trabajo y el contenido energético de los combustibles en un esfuerzo por maximizar el rendimiento de las máquinas de vapor. La termodinámica es importante no sólo para la química sino también para otras áreas de la ciencia y la ingeniería.

2. ANTECEDENTES.

2.1 INTRODUCCIÓN.

El problema que representan los aceites lubricantes usados para la salud de los seres vivos y el medio ambiente, y sus posibles soluciones, ha sido objeto de análisis en los últimos años por parte de diferentes organizaciones públicas y privadas, pertenecientes a los sectores energético, ambiental, académico y productivo del país y del mundo entero. Éstas han identificado diferentes alternativas para dar al residuo una disposición final ambientalmente adecuada, aprovechando sus características principalmente como lubricante o combustible. Estos aportes constituyen todo un proceso investigativo para lograr transformar un serio problema ambiental y de salud pública en una oportunidad energética y económica. En el presente capítulo analizaremos la experiencia internacional en el tema, También haremos un estudio cronológico de los hechos que ha vivido el país y analizaremos su impacto en la búsqueda de posibles soluciones.

2.2 EXPERIENCIA INTERNACIONAL.

2.2.1 Unión europea. La Unión Europea reguló la gestión y eliminación de los aceites usados el 16 de julio 1975 mediante la aplicación de la Directiva 75/439/CEE de la Comisión Europea⁹, institución políticamente independiente que representa y defiende los intereses de la UE en conjunto, es la fuerza impulsora del sistema institucional de la UE, propone la legislación, políticas y programas de acción y es responsable de aplicar las decisiones del Parlamento y el Consejo Europeos¹⁰. Ésta fue modificada por la Directiva 87/101/CEE del 22 de diciembre de 1986¹¹ y la 91/692/CEE de 23 de diciembre de 1991¹². La legislación española

⁹http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=es&type_doc=Directive&an_doc=1975&nu_doc=439

¹⁰ http://europa.eu.int/institutions/comm/index_es.htm

¹¹http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=es&type_doc=Directive&an_doc=1987&nu_doc=101

¹²http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=es&type_doc=Directive&an_doc=1991&nu_doc=692

incorporó esta normatividad a través de la Orden de 28 de febrero de 1989 y la del 13 de junio de 1990, que modificó a la primera, además de la Ley Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, Ley 20/1986. Esta norma define los aceites usados como cualquier aceite industrial de base mineral o lubricante que se haya vuelto inadecuado para el uso que en origen se le haya asignado y en particular los aceites usados de motores de combustión y de los sistemas de transmisión, los aceites para turbinas y sistemas hidráulicos y especialmente los aceites de motor de los talleres de automotores y embarcaciones¹³.

Las normas anteriores determinaron que la eliminación de este producto requeriría un completo apoyo de las autoridades y demás entidades públicas, que faciliten a los distintos generadores de estos productos un sistema fácil para deshacerse correctamente de ellos, para posteriormente conducirlos a tratamientos de regeneración prioritariamente, o cualquier otra forma de eliminación adecuada. Teniendo en cuenta siempre que el aceite usado es un residuo muy tóxico y peligroso para el medio ambiente, las normas también prohíben su vertido sobre suelos o aguas y la incineración incontrolada. Según estas normas, los aceites industriales o lubricantes con base mineral que resulten inadecuados para el uso que se les había asignado inicialmente deberán ser recogidos y eliminados, para lo cual se determinan los siguientes métodos según prioridad: tratamiento por refinado, combustión, destrucción y depósito controlado. Esto evidencia la visión de la UE que encuentra mayores beneficios al regenerar los aceites usados que al utilizarlos en cualquier proceso de combustión. En cualquier caso prohíbe el vertido en aguas subterráneas, marítimas jurisdiccionales y en sistemas de evacuación, el depósito o vertido con efectos nocivos en el suelo y cualquier tratamiento que provoque una contaminación atmosférica superior al nivel establecido por las distintas disposiciones legales vigentes.

¹³ Directiva 87/101/CEE de la Comisión Europea

Por otro lado, la norma Europea admite la gestión de estos residuos por parte de empresas privadas autorizadas, las cuales deben estar sometidas a registros y controles adecuados. A través de estos gestores se organizaron los servicios de recolección en puntos tales como talleres automotrices y pequeñas industrias para evitar vertidos incontrolados de los mismos. En cuanto a los Estados miembros la norma invita a la ejecución de campañas de información pública y de promoción destinada a garantizar la recolección y almacenamiento eficaces, elaborando posteriormente informes trianuales sobre la aplicación de las presentes Directivas, que la Comisión utiliza para realizar un informe comunitario.

En el Informe de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo, del 10 de enero de 2000, sobre la aplicación de la legislación relacionada con los aceites usados durante el período comprendido entre 1995 y 1997 informe mas reciente publicado hasta la fecha, la Comisión denunció que no se estaba respetando la jerarquía de los principios de gestión de aceites usados, es decir en estricto orden:

Regeneración, combustión, destrucción y depósito en vertedero seguro. De los once países que presentaron informe oficial para este periodo, sólo Alemania, Luxemburgo y Francia cumplieron con priorizar el proceso de regeneración. En general, se comprobó que cada vez se recurre más a la técnica de la regeneración¹⁴.

2.2.1.1 España. El consumo español anual de aceites industriales se encuentra aproximadamente en unas 560.000 toneladas, elevándose a 5 millones en la Unión Europea y a 40 millones en el resto del mundo¹⁵. En la actualidad en España se recogen unas 170.000 toneladas de aceites usados, lo que supone un 77% de las 220.000 toneladas del total aptas para ser recuperadas. Por lo tanto quedan fuera de control 50.000 toneladas, o sea, el 23% del total¹⁶.

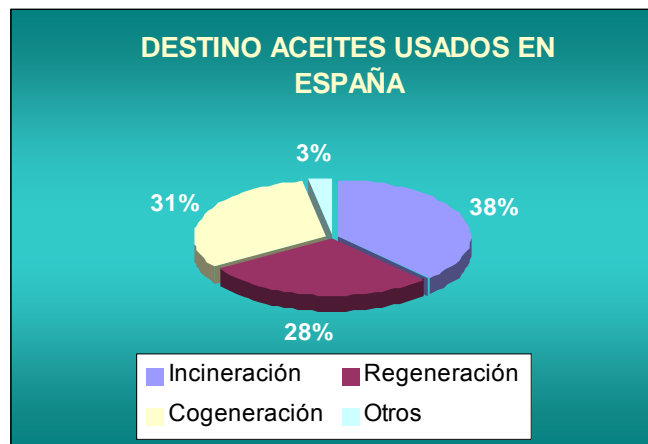
¹⁴ <http://europa.eu.int/scadplus/leg/es/lvb/l21206.htm>

¹⁵ <http://www.panoramaenergetico.com/default.htm>

¹⁶ <http://www.panoramaenergetico.com/default.htm>

Del global de aceites industriales usados recogidos cada año en España, un total de 66.000 toneladas se destinan a la incineración o combustión, 51.000 toneladas a la cogeneración, 49.000 toneladas a la regeneración y 4.000 toneladas a otros destinos¹⁷. La distribución porcentual puede apreciarse en la figura 16. El Ministerio de Medio Ambiente Español anunció que está ultimando el borrador de la futura ley sobre aceites usados industriales, que incluirá medidas técnicas y jurídicas para fomentar la regeneración de este tipo de residuos.

Figura 16. Destino de los aceites usados en España.



Fuente: <http://www.panoramaenergetico.com/default.htm>

2.2.1.2 Regeneración. De la experiencia en la Unión Europea debemos resaltar una alternativa muy interesante para el residuo. La regeneración que le permita cumplir nuevamente su función lubricante en maquinaria industrial o el sector automotor. Ya se conocen técnicas adecuadas para regenerar el aceite usado con la eficacia suficiente para devolver casi la totalidad de las propiedades iniciales al residuo, éstas incluyen procesos de centrifugación, para eliminar la contaminación por elementos libres, en suspensión y el agua, deshidratación bajo vacío para reducir la concentración del agua disuelta o emulsionada en el aceite, desgasificación bajo vacío, para eliminar gases producidos durante la degradación

¹⁷ <http://www.panoramaenergetico.com/default.htm>

del aceite, microfiltración para reducir la concentración de micropartículas sólidas en suspensión¹⁸ y mezcla de aditivos para corregir viscosidad. Ninguna de ellas es suficiente para un tratamiento completo, pero su combinación aportará unas propiedades finales óptimas al aceite resultante.

Las estimaciones conocidas consideran que alrededor de un 80 al 90% de los aceites usados existentes en la UE, son viables para ser tratados según los métodos anteriormente citados. En España existen varias plantas de este tipo repartidas por toda la geografía, como ejemplo. La empresa CATALANA DE TRACTAMENT D'OLIS RESIDUALS S.A., (CATOR)¹⁹ fue creada en Junio de 1993, realiza la gestión integral de todos los aceites que se producen en la Comunidad Autónoma de Catalunya, incluyendo las actividades de recolección, transporte, análisis, almacenamiento, regeneración o re-refinado y comercialización de bases de aceites minerales. Esta empresa presenta en su página web un diagrama del proceso que realiza para la regeneración de los aceites usados²⁰, y presenta las características de los Aceites base para la fabricación de lubricantes, el producto asfáltico para la fabricación de telas impermeabilizantes y asfaltos para carreteras, fertilizantes y demás productos que son fabricados a partir del aceite usado²¹.

En enero de 2002 el entonces Ministro de Medio Ambiente Español, Jaume Matas, inauguró una planta de regeneración de aceites usados en Madrid. Con una inversión de 9,91 millones de euros; 1.650 millones de pesetas, esta planta permite la recuperación integral de los componentes de 27.000 Tm/año de aceites usados, produciendo 20.500 Tm/año de bases para aceite lubricante y 5.000 Tm/año de asfalto. Sin embargo aun no se ha resuelto el problema por completo, es necesaria

¹⁸ <http://www.panoramaenergetico.com/default.htm>

¹⁹ <http://www.cator-sa.com/1present/empresa/empresa.htm>

²⁰ <http://www.cator-sa.com/1present/tecnologia/planta.htm>

²¹ <http://www.cator-sa.com/3product/product.htm>

la construcción de un número suficiente de estas instalaciones para conseguir dar servicio a la totalidad de los productores de estos residuos que, por otro lado, deberán contar con sistemas de gestión que facilite al productor el método para desprenderse del residuo, evitando su vertido a cauces, desagües, etc.

En cuanto a la reducción de costos de producción del aceite lubricante, es necesario hacer énfasis en que la comparación, se realiza bajo el criterio de la obtención de aceites de la misma calidad en cualquiera de los procesos. Tanto en el proceso común en la industria petrolera como en el proceso de regeneración; en el primero, dos litros de aceite se producen a partir de cien de petróleo, mientras que en el segundo caso únicamente son necesarios tres litros de aceite usado. La disminución del consumo energético necesario para la producción de lubricante a partir de aceite regenerado es muy inferior que a partir del petróleo crudo, las inversiones iniciales son menores al precisar plantas de producción mucho más simples que las refinerías petrolíferas además de contar con una reducción de las importaciones de crudo, y con ello de divisas, en países donde no existen yacimientos petrolíferos.

2.2.2 Uruguay. En Uruguay la solución al problema del residuo fue notablemente influenciada por la compañía Shell, uno de los mayores fabricantes e importadores de aceite lubricante en este país y en el mundo. El proceso se orientó hacia el aprovechamiento de las características del residuo, específicamente su poder calorífico que es similar al de un combustible tradicional. Shell diseñó junto con la Compañía Uruguaya de Cemento Pórtland S.A. (CUCPSA), un proceso que evita causar un impacto negativo al medio ambiente al realizar la combustión ya que el aceite usado contiene sustancias nocivas como metales pesados. Esto es posible en hornos de cemento Pórtland, a temperaturas superiores a los 1000 °C, con un tiempo de residencia mayor a 2 segundos, donde es dosificado adecuadamente en el fuel oil. De esta manera se elimina como contaminante generando energía.

La metodología definida para dar un uso final adecuado al residuo, definió que Shell se encarga de contactar a los clientes para introducirlos al sistema de recolección de aceite usado, otorgándoles tambores o cubas debidamente identificadas para su acopio, una empresa familiar es quien se encarga de realizar la recolección en los diferentes puntos de generación, contando principalmente con un camión y un sistema de bombeo para la recolección en pequeños tanques de almacenamiento instalados en el vehículo, una vez la capacidad del recolector es copada el residuo es llevado a un centro de acopio donde se almacena en tanques de mayor volumen, en este lugar se realiza un proceso muy simple de acondicionamiento, para luego ser analizado por el Servicio Técnico de Shell Uruguay en forma gratuita, quien de común acuerdo con los técnicos de la cementera dan el visto bueno para ser enviado al horno donde será quemado.

El aceite usado debe cumplir con una serie de requisitos para poder ser usado en el proceso de combustión, lo que implica que se realicen una serie de análisis para verificar que cumpla con las especificaciones acordadas por la cementera y la compañía Shell relacionadas principalmente con el contenido de PCBs, de lo contrario se deben realizar operaciones más exigentes de acondicionamiento. La cementera lo utiliza como combustible en su horno y a cambio reconoce un valor suficiente para cubrir los costos de la empresa recolectora permitiéndole incluso generar una utilidad. De esta forma el generador primario y todos demás miembros de la cadena de responsabilidad se deshacen de un pasivo ecológico, y la cementera compra a un precio sensiblemente inferior al precio del fuel-oil, un producto con el mismo poder calorífico. Todos los procesos relacionados con esta tarea están minuciosamente descritos en un Procedimiento de Trabajo realizado en forma conjunta entre la empresa recolectora, La C.U.C.P. S.A. y Shell Uruguay S.A. y es auditado y monitoreado continuamente por la autoridad competente, es decir el DINAMA, de forma que se asegure su cumplimiento eficientemente²².

²² <http://www.deres.org.uy/index.php?id=25&type=0>

2.3 EXPERIENCIA EN COLOMBIA.

Para establecer el orden de lo sucedido en el país con respecto a los aceites usados debemos empezar por enunciar al grupo cementero Holcim antes conocido como Holderbank, éste ha obtenido una importante experiencia en la utilización de materiales de desecho como fuente alternativa de energía en sus plantas a nivel mundial, es así como en 1994 se usaron 1.62 millones de toneladas de materiales de desecho en 53 de las 75 plantas del grupo, esto corresponde al 2.5% del total del combustible utilizado en las plantas de la organización²³. La empresa Cementos Boyacá pertenece a este grupo, sin embargo para este mismo año no contaba con la infraestructura necesaria para la utilización de ningún tipo de residuo como combustible en el horno de su planta. Siguiendo las políticas de la organización y reconociendo la oportunidad que brindaba a la industria cementera el hecho de que en el país aun no se considerara este problema, dos años después se inició esta implementación de forma experimental que terminó en 1999²⁴.

En este proceso intervinieron dos alumnos de la Facultad de Ingeniería De Diseño y Automatización Electrónica de la Universidad De La Salle a través del Proyecto de grado Control automatizado de inyección de aceite usado para la alimentación de hornos"²⁵, quienes participaron en el diseño y construcción del sistema de control para la inyección del aceite usado al horno de la planta. Este acondicionamiento generó una forma técnicamente adecuada de dar uso final al residuo, sin causar perjuicio al medio ambiente. Sin embargo éste fue sólo el primer paso para encontrar una solución real al problema.

Esta implementación llamó la atención de organizaciones estatales, privadas e incluso internacionales que empezaron a considerar la importancia de encontrar una solución al problema, conociendo de antemano el interés de un capital privado

²³Proyecto de prototipos control automatizado de inyección de aceite usado para la alimentación de hornos, Diego Alejandro Martínez, Jorge Eduardo Guacaneme, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería de diseño y Automatización Electrónica, 9 de noviembre de1999.

²⁴ <http://www.cecodes.org.co/asociados/cboyaca.htm>

²⁵ Diego Alejandro Martínez, Jorge Eduardo Guacaneme, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería de diseño y Automatización Electrónica, 9 de noviembre de1999.

que ya realizaba una inversión para cumplir con los requerimientos técnicos necesarios para quemar el residuo en condiciones ambientalmente seguras.

No sólo se requería una solución tecnológica para el aprovechamiento del residuo como combustible. También era necesario realizar un diagnóstico del problema que diera a las partes interesadas una percepción más clara de su dimensión, y las alternativas de solución frente a temas como la viabilidad de métodos de recuperación del residuo; teniendo en cuenta que éste ya tenía un valor en el mercado negro creado por falsificadores de aceite lubricante, aspecto que fue primordial para generar interés y participación activa en esta búsqueda de soluciones por parte las empresas petroleras, que sufren pérdidas considerables debido a la falsificación de sus productos. Además las organizaciones competentes tendrían que estudiar aspectos como el cambio de la cultura de utilización de los aceites usados y la legislación de los procedimientos adecuados para quienes los generan, transportan, acopian y disponen finalmente.

Teniendo esto en cuenta en 1998 el Canadian Energy Research Institute (CERI) en colaboración con el Ministerio del Medio Ambiente contrato a Gsi Environment Inc. y Lupien Rosenberg Et Asociés, Colombia Ltda., para realizar el "Estudio sobre el manejo de los aceites usados en Colombia"²⁶, de esta forma fueron determinados los volúmenes de aceite usado generados y su potencial de recuperación en las más importantes ciudades del país, este estudio también reveló los preocupantes usos que se le daban a este residuo, al ser extraído de automotores o maquinaria industrial. Estos usos y sus consecuencias se mencionan en el marco teórico. El creciente interés en el tema dio frutos, el 14 de febrero de 2000 el DAMA (Departamento Administrativo del Medio Ambiente) emitió la resolución 318 que reglamentó las condiciones técnicas para el manejo, almacenamiento, transporte, utilización y disposición de aceites usados. Esta norma junto con una gestión de

²⁶ GSI ENVIRONMENT INC y LUPIEN ROSENBERG ET ASOCIES, Colombia Ltda. Montreal, Estudio sobre el manejo de los aceites usados en Colombia, diciembre de 1999.

educación, sensibilización y sanción a infractores, adelantada por la misma entidad, logró que usos como vertimientos en el alcantarillado de la ciudad fueran controlados. Desde entonces no es común observar las manchas causadas por este residuo en las calles, e incluso en zonas industriales o de cambiaderos. Las otras formas incorrectas de utilización aunque no desaparecieron si sufrieron una considerable disminución, menos la falsificación del lubricante y la quema de éste sin acondicionamiento previo, estas practicas realmente aumentaron pues para este momento la solución al tema de la disposición final era aún insípida. Entre otras exigencias la resolución obligó a los transportadores y almacenistas del residuo a solicitar una licencia ante el DAMA para continuar con su actividad, hasta Agosto de 2003 se otorgaron 11 licencias.

La existencia de esta norma causó un impacto inmediato en las zonas más afectadas de la ciudad e incluso de las empresas generadoras de energía, esto se evidencia en los trabajos de grado, "Guía para el manejo de los aceites usados en la industria"²⁷, "Programa piloto para el manejo de los aceites usados"²⁸ y "Propuesta de manejo y almacenamiento de lubricantes nuevos y usados en las centrales generadoras de energía de EMGESA S.A. E.S.P."²⁹, desarrolladas por alumnos de la facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad de La Salle en 1999, 2000 y 2001 respectivamente. Estos trabajos establecieron los procedimientos que deben ser ejecutados en zonas industriales específicas y en las plantas de la empresa EMGESA S.A. E.S.P., en cuanto al manejo y almacenamiento del aceite usado, aclara cuales son los transportadores autorizados para retirar el residuo y el procedimiento que se debe seguir, también señala los tipos de utilización o correcta disposición que deberían darse a los aceites usados generados en cada una de estos sitios específicamente, por lo tanto en cada caso se realizó una aplicación específica de la resolución 318 del D.A.M.A.

²⁷ Richar Amilcar Caicedo. Ubicación- Referencia Universidad de la Salle sede centro, 1999.

²⁸ Olga Yolanda Pinzón Ubicación - Referencia Universidad de la Salle sede centro, 2000.

²⁹ Keidy Robinsón Ramírez - Referencia Universidad de la Salle sede centro. 24 de Abril de 2001

En ese momento la capacidad para quemar adecuadamente el residuo se limitaba a la que ofrecía Cementos Boyacá, con el agravante de que la visión de ésta empresa es ofrecer el servicio de eliminación de un residuo peligroso a través de la combustión segura³⁰, por lo tanto no se consideraba reconocer un valor económico al aceite, pues la inversión que habían realizado para el acondicionamiento del horno le permitiría a la ciudad o incluso al país solucionar el problema ambiental de la disposición técnicamente adecuada del residuo. Esta posición hacía totalmente inviable la posibilidad de generar solución al problema en el horno de la cementera, incluso llegó a considerarse la idea de exigir un pago por cada galón eliminado en su horno bajo condiciones técnicas adecuadas; el conflicto de intereses que se originó, desvió la mayor parte del residuo hacia quienes tradicionalmente hacían un uso técnicamente inadecuado, pero conocían su valor.

Aun entonces se exploraban todas las alternativas posibles, indagando las acciones que otros países habían adoptado para solucionar este mismo problema y tratando de generar ideas propias que se adecuaban mejor a las características del país, entre ellas se consideró la posibilidad de regenerar el residuo para que cumpliera nuevamente con su función lubricante, procedimiento realizado con éxito en varios países miembros de la Unión Europea. La respuesta a esta propuesta por parte de las empresas productoras no fue favorable, estas industrias como principales responsables del residuo por ser fabricantes o importadores del aceite lubricante y fuente de financiación de los proyectos encaminados a dar solución se negaron a financiar una empresa que sería competencia directa de sus propias marcas. Por otro lado ninguna de las empresas existentes quiso emprender el reto de implementar un proceso de regeneración de aceite bajo su propio sello, debido al impacto que esto tendría en el mercado Colombiano al asociar el producto final con el residuo y con el término reciclaje.

³⁰ <http://www.cecodes.org.co/asociados/cboyaca.htm>

La Unidad de Planeación Minero Energética UPME, se interesó en el tema de los aceites usados después de analizar los volúmenes disponibles para recuperación en cada una de las ciudades objeto del primer estudio, y las características combustibles que posee. Previendo un potencial energético, esta institución contrato a la firma Lupien Rosenberg Et Asociés, Colombia Ltda., para desarrollar una segunda fase del estudio denominada, "Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia"³¹. Los resultados que este estudio arrojó, muestran como el residuo puede ser tratado hasta convertirse en un combustible ambientalmente aceptable para la utilización en hornos y calderas, incluso de pequeñas y medianas industrias; También considera la viabilidad económica del proceso de acondicionamiento del residuo hasta el punto en que es apto para la combustión, demostrando que los beneficios son significativos e interesantes para los inversionistas, esto orientó la mayor parte de los esfuerzos hacia la utilización del residuo en procesos de combustión.

El estudio también permitió a la UPME publicar en su pagina web un documento llamado, "Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión"³², este documento describe el proceso al cual deben ser sometidos los aceites usados para que al momento de la combustión no generen un impacto ambiental negativo, también muestra un análisis económico del proceso hasta su acondicionamiento y posterior mezcla con otros combustibles para obtener mezclas de mejores características que produzcan mayores ingresos. La conclusión de este documento es alentadora en términos económicos, y su divulgación busca estimular inversionistas.

Pese a los esfuerzos realizados por las entidades nacionales e internacionales para estimular la inversión en este tema ambiental, que dé solución real al problema, hasta el momento solo se ha logrado atender una pequeña parte de él.

³¹ Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001.

³² <http://www.upme.gov.co>

La empresa LAHCORP realiza un proceso muy semejante al recomendado por el segundo estudio realizado por la firma Lupien Rosenberg Et Asociés, Colombia Ltda. La capacidad de respuesta que ofrece esta empresa frente al problema es insuficiente pues mientras su capacidad de tratamiento es de 5.000 galones por día sólo en la ciudad de Bogotá se generan 12.400 galones por día.

Haciendo frente a la responsabilidad que les otorga la ley 430 de 1998 que dicta que, las empresas que importan o producen residuos peligrosos en el país son responsables del manejo que se dé al residuo que se genera después de su utilización tanto como el mismo generador, las empresas petroleras junto con la organización que las asocia han creado el fondo de aceites usados. Este fondo constituido por las empresas CASTROL, TERPEL, CHEVRON TEXACO, EXXONMOVIL y SHELL convinieron la creación de este instrumento con el fin de apoyar iniciativas que den solución auto sostenible para el problema de los aceites usados y que a su vez, permita atacar el problema de la falsificación de sus productos. Hasta el momento, por parte de este fondo no se ha logrado generar ningún tipo de solución al problema, los principales obstáculos para tomar la decisión de apoyar alguna iniciativa han sido la falta de compromiso por parte de los oferentes con la cofinanciación y la sostenibilidad de sus proyectos en el tiempo.

En mayo de 2003 se emitió el Decreto 1180 emitido por el Ministerio De Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, documento que recopila la normatividad relacionada con las licencias para la ejecución de proyectos, este decreto aplica para el manejo de los aceites usados y reemplaza la Resolución 318 en cuanto a licencias de operación para el caso de la zona jurisdicción del DAMA y cualquier otra norma anterior emitida en el territorio nacional. Debido a su importancia el DAMA junto con la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) publicaron un documento llamado "Manual de normas y procedimientos para la gestión de aceites usados", este manual busca explicar de forma clara los procedimientos que exige el decreto para el manejo del residuo en cualquiera de

sus etapas. También muestra las facilidades económicas, financieras y tributarias que ha generado el estado Colombiano, para incentivar la inversión de capital privado en este tema.

Estos esfuerzos comunes buscan lograr incentivar la creación de nuevas organizaciones interesadas en el negocio, que atiendan la oferta de aceite usado que se ha generado debido a la normatividad y a la gestión de las autoridades ambientales. Mientras esta oferta no pueda ser atendida totalmente, el residuo seguirá siendo motivo de preocupación para el país, pues si éste no se dispone adecuadamente, necesariamente su fin cualquiera que sea, tendrá un impacto negativo en el medio ambiente e incluso en la salud de las personas. Por esto la investigación para la búsqueda de soluciones no puede detenerse, es imprescindible buscar nuevas alternativas que sean suficientemente atractivas como para motivar la creación de empresas que disminuyan la cantidad del residuo en usos inadecuados. Es precisamente esa la intención de este trabajo, analizar una opción más que pueda generar interés y posiblemente un aumento de la capacidad para atender la oferta de aceites usados en la ciudad.

3 . EVALUACIÓN TÉCNICA.

3.1 INTRODUCCIÓN.

El problema de la utilización de un material no convencional o alternativo como combustible, radica básicamente en los siguientes aspectos.

En cuanto al Material.

- Que el poder calorífico del material sea suficientemente importante como para considerar la posibilidad de utilizarlo como fuente energética en un proceso industrial. En general la sustitución de un combustible de bajo poder calorífico por uno de alto poder es más fácil que al contrario como consecuencia del volumen del hogar en cada caso³³.
- Que el material pueda ser acondicionado, en caso de ser necesario modificar sus propiedades físicas o químicas, tales como viscosidad, densidad, contenido de sustancias contaminantes o cualquier otra característica para que durante la combustión no se afecten negativamente los equipos, el proceso, o el medio ambiente.
- Que la cantidad de material disponible sea suficiente para cubrir las necesidades del proceso al cual se integrará como combustible.

En cuanto a los equipos.

- Que los equipos comprometidos en la combustión, tengan la capacidad de manejar el nuevo material para realizar la combustión sin sufrir daños,

³³ La industria del Carbón – Aspectos Técnicos y Ambientales. Curso del programa de especialización de Gestión Energética y Ambiental, Universidad de la Salle. 2003

conservando niveles de emisión de sustancias tóxicas al ambiente aceptables de acuerdo con las normas vigentes.

Analizaremos de cada uno de los aspectos mencionados anteriormente para determinar si es técnicamente viable utilizar los aceites usados como fuente primaria de energía en motores diesel ó calderas de vapor.

3.2 ACEITE USADO COMO COMBUSTIBLE.

3.2.1 Poder calorífico. Esta característica de los aceites usados es difícil de precisar debido al origen del material. Cuando se realiza el cambio de aceite a un automotor ó maquinaria industrial, se toman todas las precauciones posibles para evitar la contaminación del lubricante nuevo con cualquier sustancia que pueda modificar sus características. Sin embargo cuando el proceso ha terminado, el residuo que ya prestó su servicio no es tratado igualmente, los recipientes donde se almacena pueden contener en el mejor de los casos partículas de polvo, estos recipientes permanecen abiertos y descuidados sobre todo en los establecimientos que realizan el cambio de lubricante a automotores, esto permite la entrada de aguas lluvias o la combinación del residuo con otras sustancias sólidas y líquidas.

Sin embargo, en casi todos los casos, el poder calorífico de los aceites usados, supera en mucho al de otros residuos comúnmente utilizados en el país como combustible, entre ellos están la cascarilla de arroz y el bagazo.

En la tabla 16 se muestran diferentes residuos con su respectivo poder calorífico. Debido a que esta característica no está expresada en las mismas unidades se muestra también su costo en función de este poder calorífico para facilitar su comparación.

Tabla 16. Residuos usados en procesos de combustión.

RESIDUOS USADOS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN	PODERES CALORIFICOS		COSTOS				\$/MBTU
	Unidad	Contenido	Unidad	Equivalencia	Unidad	Costo	
Aceites usados	BTU/Gal.	138000	Gal.	7,25	\$/Gal.	73	\$527
Llantas usadas	BTU/Kg.	30349	Kg.	32,95	\$/Kg.	200	\$6,590
Solventes	BTU/Kg.	28452	Kg.	35,15	\$/Kg.		...
Cartón encerado	BTU/Kg.	24915	Kg.	40,14	\$/Kg.	120	\$4,816
Aserrín de Pino	BTU/Kg.	18776	Kg.	53,26	\$/Kg.	50	\$2,663
Aserrín comportado	BTU/Kg.	18260	Kg.	54,76	\$/Kg.		...
Papel periódico	BTU/Kg.	18071	Kg.	55,34	\$/Kg.	150	\$8,301
Pinturas y resinas gastadas	BTU/Kg.	17545	Kg.	57,00	\$/Kg.		...
Cartón corrugado	BTU/Kg.	16818	Kg.	59,46	\$/Kg.	120	\$7,135
Papel moneda	BTU/Kg.	16736	Kg.	59,75	\$/Kg.		...
Cartón para alimentos	BTU/Kg.	16421	Kg.	60,90	\$/Kg.	100	\$6,090
Papel cubierto con plásticos	BTU/Kg.	16348	Kg.	61,17	\$/Kg.	
Papel	BTU/Kg.	16123	Kg.	62,02	\$/Kg.	300	\$18,607
Torta (Ind. Pulpa & Papel)	BTU/Kg.	14452	Kg.	69,19	\$/Kg.		...
Papel y residuos de oficina	BTU/Kg.	14153	Kg.	70,66	\$/Kg.	300	\$21,197
Cascarilla de arroz	BTU/Kg.	12803	Kg.	78,11	\$/Kg.		...
Bagaso	BTU/Kg.	10907	Kg.	91,68	\$/Kg.		...
Lodos (Ind. Pulpa & Papel)	BTU/Kg.	7812	Kg.	128,01	\$/Kg.		...

Fuente: GSI ENVIRONMENT INC y LUPIEN ROSENBERG ET ASOCIES, Colombia Ltda. Montreal, Estudio sobre el manejo de los aceites usados en Colombia, diciembre de 1999.

Al revisar la tabla se hace obvia la importancia que tiene este residuo como fuente de energía. El poder calorífico del aceite usado es incluso similar al del Diesel (ACPM), esto implica un excelente desempeño del residuo como fuente energética. En la tabla 14 se muestra el poder calorífico de algunos combustibles frente al aceite usado y su costo en función de este poder calorífico.

Tabla 17. Combustibles fósiles y su poder calorífico.

COMBUSTIBLES FOSILES	PODERES CALORIFICOS		COSTOS				\$/MBTU
	Unidad	Contenido	Unidad	Equivalencia	Unidad	Costo	Costo
Crudo de castilla	BTU/Galón	152000	Galón	6,58	\$/Gal.	450	\$2,961
Fuel Oil Cib	BTU/Galón	150000	Galón	6,67	\$/Gal.	800	\$5,333
Aceites Usados	BTU/Galón	138000	Galón	7,25	\$/Gal.	73	\$527
Diesel (ACPM)	BTU/Galón	138000	Galón	7,25	\$/Gal.	1880	\$13,623
Kerosene	BTU/Galón	134000	Galón	7,46	\$/Gal.	1550	\$11,567
Gasolina 87-93 oct	BTU/Galón	115400	Galón	8,67	\$/Gal.	2270	\$19,671
Gas propano	BTU/Galón	92000	Galón	10,87	\$/Gal.	913	\$9,924
Gas natural	BTU/M ³	35515	M ³	28,16	\$/M ³	310	\$8,729
Carbón mineral	BTU/Kg	26741	Kg.	37,40	\$/Kg.	55	\$2,066
Energía eléctrica	BTU/Kwh	3420	KWh	292,40	\$/KWh	160	\$46,784

Fuente: GSI ENVIRONMENT INC y LUPIEN ROSENBERG ET ASOCIES, Colombia Ltda. Montreal, Estudio sobre el manejo de los aceites usados en Colombia, diciembre de 1999.

En los últimos años la búsqueda de energías alternativas se ha intensificado, debido al posible futuro desabastecimiento que sufrirá el planeta por la escasez de recursos naturales, en particular los no renovables, para suplir la creciente demanda. En este contexto reconocer un residuo que tiene características de combustión similares a los combustibles fósiles comerciales y cuya disponibilidad es considerable en las principales ciudades del país³⁴, representa una oportunidad interesante para ser analizada por los visionarios y encargados de la planeación energética.

3.2.2 Acondicionamiento del residuo.

3.2.2.1 Procesos de minimización en origen/reprocesado de aceites minerales usados.

La aplicación de los criterios de prevención y reducción de la contaminación

³⁴ GSI ENVIRONMENT INC y LUPIEN ROSENBERG ET ASOCIES, Colombia Ltda. Montreal, Estudio sobre el manejo de los aceites usados en Colombia, diciembre de 1999.

en origen sugiere, como primera opción en cuanto a las actuaciones a llevar a término con los aceites usados, aquellas encaminadas al reprocesado del aceite usado. Sin embargo, se trata de actuaciones muy incipientes y que no están generalizadas como sistema de tratamiento en las industrias.

El reprocesado conlleva la recuperación del aceite usado y la reconversión en aceite de primera calidad, válido para ser usado en el proceso de producción. Con este tipo de actuaciones se consigue un triple objetivo:

- Se reduce considerablemente la cantidad de aceite usado considerado como residuo.
- A nivel empresarial se da un importante ahorro en la compra de aceites nuevos.
- Se alarga el ciclo de vida del aceite al reintroducir el aceite reprocesado en el mismo ciclo productivo.

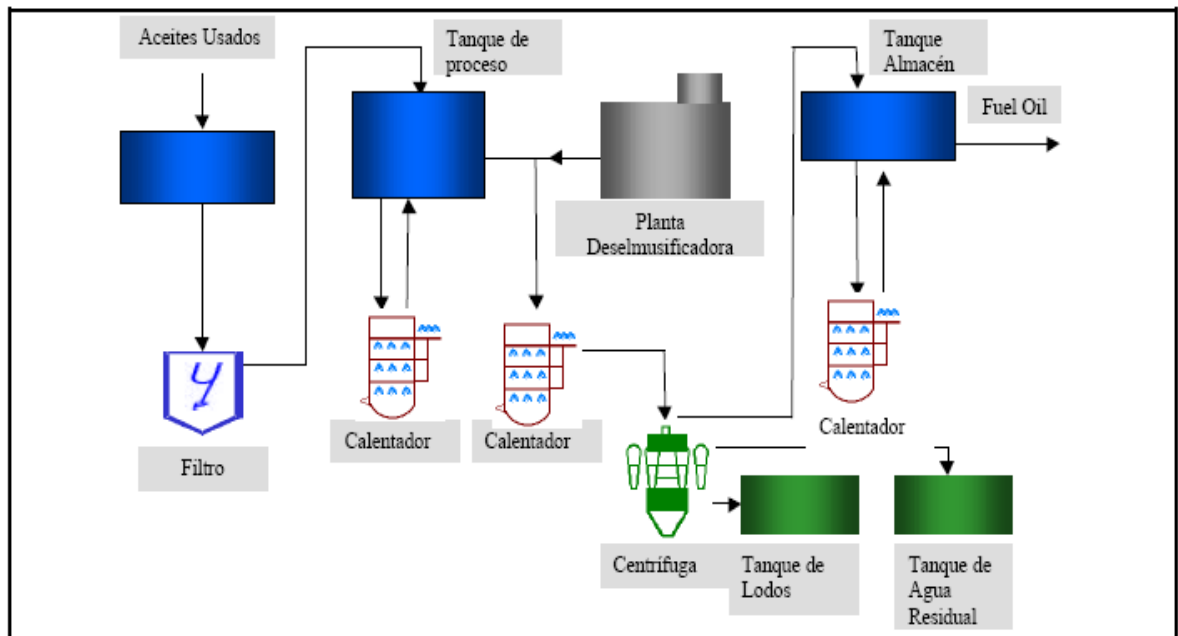
Los procesos que tienen como objetivo la minimización en origen se basan en los siguientes pasos:

1. Destilación al vacío: fase de deshidratación y de desgasificación, eliminando también otros contaminantes volátiles.
2. Ultra filtración: fase en la que se somete el aceite usado a procesos de sedimentación y filtración para eliminar partículas metálicas y otros sólidos contenidos en el aceite.
3. Readitivación: durante todo este proceso se van incorporando aditivos para obtener aceite limpio con las características deseadas.

Con anterioridad a la introducción del aceite en el sistema, se realizan análisis químicos para conocer el estado del aceite usado y de esta manera poder definir la intensidad de tratamiento y aditivación a realizar para obtener las características finales deseadas.

3.2.2.2 Proceso diseñado por la empresa Lupien Rosenberg Et Asocies Colombia Ltda., y publicado por la UPME. Este proceso incluye etapas de Filtración para retirar partículas gruesas, remoción de partículas finas mediante procesos de sedimentación y centrifugación y la adición de desémulsificantes para el rompimiento de emulsiones formadas con el agua. En la figura 17 se puede observar el diagrama del proceso propuesto.

Figura 17. Diagrama de proceso para acondicionamiento de los aceites usados.



Fuente: Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión, UPME, 2001.

Una vez realizado el proceso descrito anteriormente el aceite usado es liberado de la gran mayoría de sustancias nocivas, a tal punto que deja de ser considerado como un residuo peligroso³⁵. En la tabla 18 se realiza una comparación de la

³⁵ Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión, UPME, 2001.

cantidad de sustancias nocivas contenidas en el aceite usado antes y después del proceso de refinamiento.

Tabla 18. Contenido de contaminantes antes y después del proceso de acondicionamiento.

TRATAMIENTO DE SEPARACIÓN		
CONTAMINANTES	ANTES	DESPUES
Cloro, %w	0.17 - 0.47	0
S, %w	0.17 - 1.09	0
Zn, ppm	260 - 1787	Trazas
Ca, ppm	211 - 2291	Trazas
Ba, ppm	9 - 3906	Trazas
P, ppm	319 - 1550	0
Pb, ppm	85 - 21676	Trazas
Al, ppm	0.6 - 758	0
Fe, ppm	97 - 2411	Trazas

Fuente: Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión, UPME, 2001.

Un material con tal poder calorífico y libre de las sustancias que hacían técnicamente inconveniente su combustión, se constituye en una excelente alternativa energética. Por lo tanto la recomendación del estudio presentado a la UPME considera la mezcla de este material con combustibles tradicionales como combustóleo y ACPM en diferentes proporciones que permiten obtener diferentes calidades de combustibles comparables a los fuel oil No 2, 4, 5 Light y 5 Heavy, que superan incluso algunas características relacionadas con el contenido de cenizas y facilidad de manejo. Estos combustibles resultantes cumplen cabalmente con las especificaciones establecidas por la norma ASTM D 396. Standard for Testing methods. La tabla 19 muestra las opciones de mezclas energéticas posibles.

Tabla 19. Viscosidad (Saybolt Furol Ssf) del Fuel Oil, Combustóleo, Acpm

VISCOSIDAD DEL FUEL OIL (Saybolt Furol SSF)		
Combustible	Mínima a 50 °C	Máxima a 50°C
Fuel Oil No 2	180	300
Fuel Oil No 4	198.2	241
Fuel Oil No 5 Light	188.8	241
Fuel Oil No 5 Heavy	241	283
Fuel oil No 6	430	638
ACPM*	2.5	6.0

*La viscosidad cinemática del Diesel Premium (ACPM) esta dada a 37.8°C, centiestocos (cst)

Fuente: Calidad de los combustibles según especificaciones establecidas por la Norma Técnica Ecuatoriana NTE-INEN y análisis realizado, norma ASTM D 3606, Dirección Nacional de Hidrocarburos (DNH) del Ministerio de Energía y Minas, 2003

Tabla 20. Opciones de mezclas energéticas posibles.

OPCIONES DE MEZCLAS ENERGÉTICAS POSIBLES					
MEZCLA POSIBLE	PROPORCIONES (% volumen)			VISCOSIDAD RESULTANTE	
	ACEITE USADO	ACPM	COMBUSTÓLEO	SSU a 38°C	SSF a 50°C
Fuel Oil No 2	31	69		32.6	
Fuel Oil No 2	52	48		37.9	
Fuel Oil No 4	69	31		45	
Fuel Oil No 4	88		12	125	
Fuel Oil No 5 Light	66		33	300	23
Fuel Oil No 5 Heavy	37		63	900	40

Fuente: Transformación de aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión, UPME, 2001.

Las cantidades anteriormente mencionadas se asumen como "Hasta" en el porcentaje de aceite³⁶.

³⁶ www.cepis.ops-oms.org/bvsci/fulltext/ecuador/anexo3.pdf,
http://www.ecopetrol.com.co/paginas.asp?pub_id=36291&cat_id=962&idCategoriaprincipal=2&cat_tit=Fuel%20Oil

3.2.2.3 Sistemas de valorización energética. La valorización energética es una de las posibles vías de aplicación de los aceites usados y ha sido la aplicación que tradicionalmente se ha utilizado más.

No obstante, y según las tendencias actuales, existen otras posibles aplicaciones de los aceites usados que ambientalmente son más recomendables, principalmente en el sentido de una menor utilización de los recursos naturales.

Dentro de este grupo se pueden diferenciar las siguientes vías:

- Aprovechamiento para la obtención de calor: es la aplicación que mayoritariamente se les ha dado, especialmente en cementeras, refinerías, etc.
- Aprovechamiento en equipos de cogeneración para generar electricidad: aplicación como combustible para activar motores acoplados a equipos generadores.

Dichas utilidades, propiamente, no se pueden considerar tecnologías, motivo por el que no se desarrollan más en este punto. No obstante, en apartados posteriores se hace referencia a dichas aplicaciones y se presenta un caso práctico de aplicación en equipos de cogeneración.

3.2.2.3.1 Aplicación directa como combustible. Plantas de fabricación de cemento.

En los hornos de las plantas de fabricación de cemento se requieren altas temperaturas para transformar las materias primas en cemento. Estas materias primas son altamente alcalinas. Por tanto, estos hornos tienen condiciones ideales para la recuperación energética de los aceites usados en condiciones respetuosas con el medio ambiente. Elementos contaminantes como hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos clorados y metales pesados se destruyen en las plantas de producción de cemento.

De las experiencias existentes en la actualidad se deduce que cuando se utilizan aceites usados como sustitutos de combustibles convencionales, no se aprecian incrementos significativos en cuanto a emisiones de partículas en la atmósfera, en particular de compuestos orgánicos, dioxinas, furanos y otros.

La alcalinidad de las materias primas neutraliza compuestos como óxidos de azufre y de nitrógeno, cloruros de hidrógeno, y por tanto reducen las emisiones en la atmósfera de estos gases.

Otras partículas de menor tamaño son recogidas mediante precipitación electrostática o mediante filtrado, siendo posteriormente devueltas a los hornos.

Las cenizas resultantes de compuestos incombustibles (metales pesados presentes en los aceites usados) se someten a procesos de encapsulado.

Como combustible para calefacción, se presenta normalmente en talleres mecánicos de automoción, de manipulación de hierro, etc. En este caso el aceite usado es quemado en estufas especialmente diseñadas para la utilización de este tipo de combustible. Con este sistema se dan emisiones a la atmósfera de metales volátiles, principalmente plomo y cloruros. No obstante las emisiones de plomo se pueden considerar mínimas respecto a otras fuentes de emisión.

Debido a las emisiones que se pueden producir con este sistema, se trata de una aplicación poco recomendable desde el punto de vista medioambiental.

3.2.2.3.2 Aplicación como combustible después de un leve tratamiento. Se entiende como tratamiento leve aquel que comporta una limpieza simple del aceite previa a su utilización. Después de eliminar el agua y sedimentos del aceite usado, éste puede ser aplicado como sustituto del gasóleo industrial en plantas de fabricación de conglomerados bituminosos.

De la información existente en la actualidad, se deriva que las emisiones de metales en estas plantas son superiores a las que se dan en las cementeras anteriormente nombradas, pero, en los países en que se utiliza, suelen ser inferiores a las emisiones máximas autorizadas por la normativa. En estas plantas los elementos nocivos, principalmente metales, son fijados por las rocas calcáreas utilizadas, posteriormente, se encapsulan con compuestos bituminosos y de esta forma se evita la producción de lixiviados. La temperatura de combustión en que se trabaja no es suficiente para destruir los PC13 Respecto a las emisiones de ácidos, el hecho de trabajar con rocas calcáreas conlleva la neutralización de los ácidos.

3.2.2.3 Aplicación como combustible después de un tratamiento severo. Los tratamientos severos son aquellos que comportan extracción de agua y destilación al vacío, obteniendo finalmente, aceites de base de calidad.

La tecnología Vaxon produce gasoil de buena calidad. Los residuos procedentes de la destilación, que contienen la mayoría de los metales, pueden ser utilizados como componentes para las mezclas asfálticas.

3.2.2.4 Lodos aceitosos. Luego de realizada la operación de separación, se originan desechos o lodos muy ácidos con alto contenido en hidrocarburos aromáticos policíclicos, ácido sulfúrico y compuestos sulfurosos así como metales pesados; se deben disponer de forma tal que asegure que estos metales no serán absorbidos por los seres vivos. Dadas las características físicas y químicas de estos lodos no pueden ser destinadas a vertederos. La aplicación principal, juntamente con las tierras del proceso, se da en forma granulada a las plantas de fabricación de cemento. La recomendación para el tratamiento de estos lodos en el país es el encapsulamiento en clinker para la producción de cemento³⁷. Esta industria ha mostrado un permanente interés en el tema como se mencionó en el capítulo dos, de hecho en algunas plantas se han realizado algunas pruebas.

3.2.3 Disponibilidad del residuo. Como se menciona en el primer capítulo, en Colombia el mercado de aceite lubricante fluctúa alrededor de 50 millones de galones anuales, de los cuales se ha calculado un potencial de recuperación cercano a los 17.7 millones de galones³⁸, en Bogotá se consumen 15'000.000 de galones anuales de aceites lubricantes de los cuales aproximadamente el 30% pueden ser recuperados³⁹. Esto significa que al año es posible realizar la recolección de aproximadamente 4'500.000 galones del residuo. Además es importante recordar que la empresa LAHCORP ya realiza un proceso de acondicionamiento de aceite lubricante usado con una capacidad de 5.000 galones

³⁷ Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001.

³⁸ Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001.

³⁹ Manual de normas y procedimientos para la gestión de aceites usados, DAMA, Bogotá, Agosto de 2003.

diarios lo que corresponde a 1'825.000 galones al año. Es decir aproximadamente el 40% del total recuperable. La empresa Cementos Boyacá cuya planta esta en capacidad de quemar los aceites usados sin causar perjuicio al ambiente puede consumir una cantidad de aceites usados mayor a la disponible, esto teniendo en cuenta las características técnicas, sin embargo, si recordamos la posición de la compañía cementera respecto a reconocer un valor económico al residuo, por ser solo uno de varios aprovechables en su horno, podríamos despreciar su impacto en la búsqueda de soluciones para el gran volumen aun disponible que esta cercano a los 2'600.000 Galones/Año.

3.3 EQUIPOS DE COMBUSTIÓN.

3.3.1 Motores diesel. Los combustibles que se obtienen a través del proceso de acondicionamiento y mezcla diseñado por Lupien Rosenberg Et Asociés, Colombia Ltda., en el segundo estudio contratado por la UPME y publicado por esta entidad en el documento Transformación de los aceites usados para su utilización en procesos de combustión⁴⁰, son tipo fuel oil. En estos documentos se hace énfasis en que tales combustibles deben ser dedicados de forma exclusiva a generación de calor, y de ninguna manera son aptos para utilización en motores Diesel ó automotores.

Teniendo en cuenta que estos documentos son los únicos que se han pronunciado en forma oficial y confiable, en cuanto a la divulgación de un proceso de acondicionamiento para los aceites usados en el país, y que el diseño de un proceso de acondicionamiento que permita la utilización del producto final en los motores Diesel no está al alcance de este estudio, debemos concluir que no es viable técnicamente la utilización de la tecnología Diesel para generar energía eléctrica utilizando aceites usados como fuente primaria de energía en el país.

3.3.2 Calderas. Existen básicamente dos escenarios para el análisis de los requerimientos de los equipos, el primero de ellos considera la adecuación de la

⁴⁰ <http://www.upme.gov.co>

caldera para quemar el residuo sin tratamiento previo, es decir sin realizar la separación de agua, metales pesados y otros contaminantes que pueda contener este material.

Para que esto sea posible es imprescindible que en la cámara de combustión la temperatura nunca sea inferior a 800 °C y además el tiempo de retención de los gases dentro de dicha cámara sea mayor o igual a 2 segundos. Estas condiciones son posibles en hornos de una planta cementera como Cementos Boyacá, el proceso de esta industria exige temperaturas incluso superiores a los 1500 C° y el tiempo de retención de los gases es de 4 a 6 segundos como consecuencia del tamaño del horno por lo tanto en este caso, tales condiciones pueden darse. De hecho gracias a la adecuación que hizo en su sistema de inyección del combustible Cementos Boyacá puede utilizar aceite usado sin tratamiento previo y sin causar perjuicio al medio ambiente. Si bien estas condiciones de la combustión están dentro de los rangos de operación de las calderas comerciales⁴¹, el material particulado del combustible puede ocasionar efectos devastadores por erosión, escorificación (Slagging) y taponamiento (Fouling) de las superficies convectivas del generador de vapor, por lo tanto el aceite usado sin tratamiento previo no podría ser utilizado para generar energía eléctrica.

El segundo escenario considera la utilización del residuo después de sufrir un proceso que se inicia con el recibo y filtración en línea del aceite usado, el cual se bombea hacia el tanque de almacenamiento pasando a través de un filtro de canasta que retiene partículas gruesas.

Del tanque del aceite usado se bombea a un tanque mezclador con calentamiento, recibiendo en línea la adición de la mezcla agua-demulsificante en la proporción recomendada por el proveedor, que es alrededor de 150 - 200 ppm.

El tiempo de retención en el tanque es apenas el suficiente para asegurar la temperatura (alrededor de 60°C) y homogeneidad requerida en la mezcla y pasa

⁴¹ Steam, Babcock y Wilcox

seguidamente a la centrífuga, la cual separa tres fases: aceite usado, agua y lodo⁴².

Después de esta separación el aceite usado se bombea a un tanque de almacenamiento para su posterior mezcla con ACPM ó Combustóleo para obtener combustibles semejantes a los Fuel Oil No 2, 4, 5 Light y 5 Heavy. Estos combustibles resultantes cumplen con todos los requerimientos de la norma ASTM D 396 (standard for testing methods). Bajo estas condiciones los equipos que intervienen en el proceso de combustión no requieren ningún tipo de modificación, aun cundo se tratara de equipos para pequeñas o medianas industrias, pues las características del combustible resultante son compatibles con los ya existentes.

3.3.3 Hornos. Es el uso que se le esta dando actualmente en Plantas Cementeras, también podría llevarse a cabo en la industria ladrillera con mínimo acondicionamiento. Sin embargo el objeto del estudio es generación de energía eléctrica a partir de la fuente primaria.

⁴² Utilización en Colombia de Aceites Usados como Energéticos en Procesos de Combustión. Lupien Rosenberg et Associés, 2001

4 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA.

4.1 INTRODUCCIÓN.

En el presente capítulo se hará una descripción de los aspectos más importantes relacionados con la topología de la central, se determinarán las características del generador, el transformador principal y el transformador de servicios generales, se analizará la eficiencia esperada de la planta con el fin de cuantificar la cantidad de energía que la central podrá vender. Esta información es imprescindible para realizar el análisis económico del proyecto.

4.2 TECNOLOGÍA DE GENERACIÓN.

La tecnología elegida para realizar la producción de energía eléctrica es la planta térmica a vapor, puesto ésta utiliza como combustible combustóleo que se elabora a partir de productos residuales obtenidos de procesos de refinación del petróleo crudo y que es un aceite altamente viscoso, requiriendo un buen precalentamiento.

En los generadores de vapor y hornos de proceso que utilizan combustóleo como fuente primaria de energía se presentan problemas de emisión de partículas inquemadas y sustancias contaminantes produciendo elevadas concentraciones de productos contaminantes en chimenea y consumos excesivos de combustible debido a la alta viscosidad del combustóleo que favorece la formación de gotas de combustible de tamaño grande con la consecuente dificultad para quemarse completamente. Además, debido a su alto contenido de asfaltenos su combustión requiere de excesos de aire elevados para lograr un buen quemado, lo que va en detrimento de la eficiencia térmica. Esto, en combinación con temperaturas altas de flama, crea las condiciones propicias para que se incremente la formación de óxidos de nitrógeno.

Se han realizado esfuerzos tecnológicos para el desarrollo de atomizadores que controlen el tamaño de gota reduciéndola al máximo posible, y aerodinámica de

quemadores de equipos de combustión haciéndolos más eficientes y con baja emisión de contaminantes.

El combustóleo por sus características físico-químicas no es posible utilizarlo en motores de combustión interna por su alta viscosidad, alto contenido de asfáltenos, la formación de óxidos de nitrógeno, excesos de aire para su combustión, y por la gran cantidad de contaminantes que son enviados al medio ambiente.

Por las características del combustible comprobadas no es factible utilizar un generador Diesel.

4.3 CICLO TERMODINÁMICO.

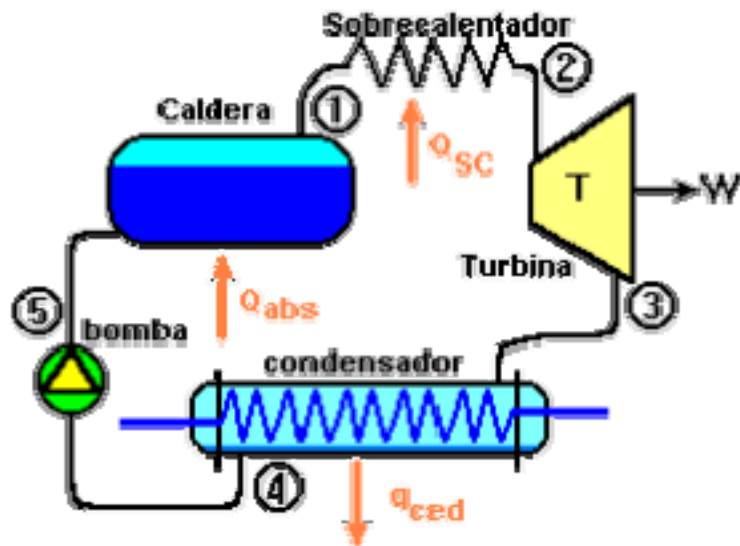
A continuación se explican brevemente las generalidades del ciclo termodinámico que será aplicado.

4.3.1 Ciclo de Rankine. El ciclo de Rankine es la base para la mayor parte de las máquinas o plantas que funcionan con vapor, entre ellas las centrales térmicas. El esquema básico de la planta requerida basada en un ciclo de Rankine se muestra en la figura 18.

Esta planta está conformada por:

- Caldera.
- Sobrecalentador
- Turbina de Vapor.
- Condensador.
- Bomba de alimentación.

Figura 18. Esquema del equipo de un ciclo Rankine.



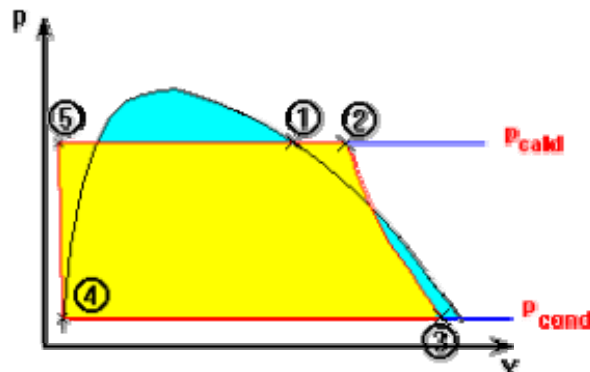
Fuente: Termodinámica, Donald E. Richards, Mc Graw Hill.

La bomba recolecta condensado a baja presión y temperatura. Típicamente una presión menor a la atmosférica, estado (4) y comprime el agua hasta la presión de la caldera (5). Este condensado a menor temperatura de la temperatura de saturación en la caldera es inyectada a la caldera. En la caldera primero se calienta, alcanzando la saturación y luego se inicia la ebullición del líquido. En (1) se extrae el vapor de la caldera (con un título muy cercano a 1) y luego se conduce el vapor al sobrecalentador. Este elemento es un intercambiador de calor (similar a un serpentín) al que se le entrega calor a alta temperatura. Por lo tanto el vapor se calienta (aumentando su temperatura) hasta salir como vapor sobrecalentado en el estado (2). El vapor que sale del sobrecalentador se lleva al expansor o turbina. Allí se expande, recuperando trabajo, en la turbina, hasta la presión asociada a la temperatura de condensación (3). El vapor que descarga la máquina entra al condensador donde se convierte en agua al entrar en contacto con las paredes de tubos que están refrigerados en su interior (típicamente por agua). El condensado se recolecta al fondo del condensador, donde se extrae (4) prácticamente como líquido saturado.

Allí la bomba comprime el condensado y se repite el ciclo.

En el diagrama p - V , el ciclo se describe como sigue (los puntos termodinámicos están indicados con pequeñas cruces, cerca del número correspondiente): En (1) la caldera entrega vapor saturado (por lo tanto con título $x=1$). Luego se tiene el proceso (1)-(2) en que el vapor es sobrecalentado a presión constante. Sale en el estado (2) y allí entra a la turbina. Allí el vapor se expande entre la presión de la caldera y la presión del condensador [proceso (2)-(3)], produciendo el trabajo W . La turbina descarga el vapor en el estado (3). Este es vapor con título $x < 1$, pero más seco, es admitido al condensador. Aquí se condensa a presión y temperatura constante, evolución (3)-(4), y del condensador se extrae líquido condensado con título $x=0$, en el estado (4). Luego la bomba aumenta la presión del condensado de p_{cond} a p_{cald} , evolución (4)-(5) y reinyecta el condensado en la caldera.

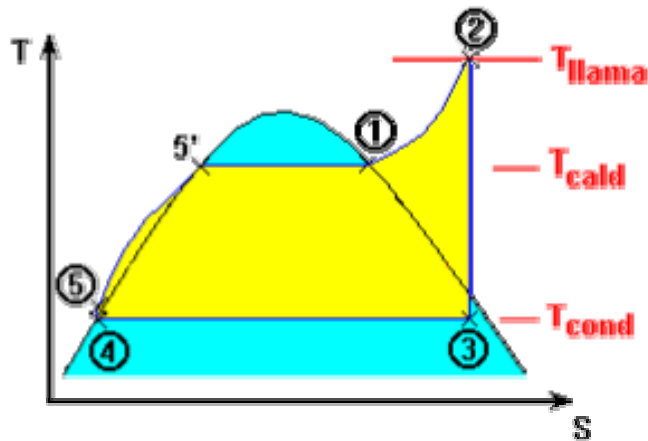
Figura 19. Diagrama P - V del ciclo Rankine.



Fuente: Termodinámica, Donald E. Richards, Mc Graw Hill.

El diagrama Temperatura vs. Entropía de este ciclo se observa en la figura 20.

Figura 20. Diagrama T - S del ciclo Rankine.



Fuente: Termodinámica, Donald E. Richards, Mc Graw Hill.

El vapor está inicialmente con título 1, como vapor saturado (1), luego se sobrecalienta en el proceso (1)-(2) el vapor se expande en la turbina, generando trabajo, evolución (2)-(3). Esta evolución es, en principio, isentrópica. A la salida de la turbina el vapor tendrá título inferior a 1, pero saldrá mucho más seco. Incluso nada impide que el vapor saliera como vapor sobrecalentado.

El vapor que descarga la turbina es admitido al condensador, donde condensa totalmente a temperatura y presión constantes, evolución (3)-(4). Sale del condensador en el estado (4) como líquido saturado (título $x=0$). Ahora el condensado es comprimido por la bomba, evolución (4)-(5), aumentando su presión hasta la presión de la caldera. En el estado (5) el líquido está como líquido subsaturado. Este se inyecta a la caldera, con un importante aumento de temperatura y entropía, hasta alcanzar la saturación. Allí comienza la ebullición. Todo el proceso (5)-(1) ocurre dentro de la caldera. El punto 5' que es cuando se alcanza la saturación.

4.3.2 Rendimiento del ciclo Rankine. El rendimiento del ciclo esta dado por la relación entre el trabajo neto producido, sobre el calor suministrado al agua por el combustible, la siguiente ecuación ilustra esta relación.

$$\eta_t = \frac{W_{T,sal} - W_{B,ent}}{q_{sum}}$$

Donde:

η_t = Eficiencia del ciclo termodinámico.

$W_{T,sal}$ = Trabajo de salida realizado por la turbina.

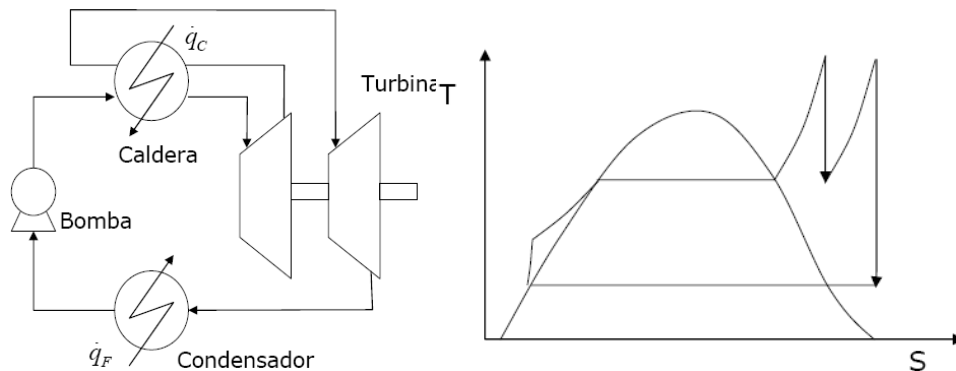
$W_{B,ent}$ = Trabajo de entrada realizado por la bomba.

q_{sum} = Calor suministrado al agua por el combustible.

Es posible mejorar el rendimiento del ciclo Rankine a través de la utilización de los siguientes equipos.

- Recalentador de vapor.
- Calentadores de agua (de baja y alta presión)
- Economizadores y calentadores de aire.
- Turbinas de media y baja presión.

Figura 21. Turbinas de media y baja presión y Diagrama de T - S del ciclo



4.3.3 Divergencia entre los ciclos ideales y reales. En los procesos térmicos se presentan pérdidas de energía en las diferentes etapas del proceso, para el ciclo de Rankine estas pérdidas están presentes en:

- Pérdidas en la tubería.

- Pérdidas en la caldera.
- Pérdidas en la turbina.
- Pérdidas en la bomba.
- Pérdidas en el condensador.

Esta condición marca una diferencia entre el ciclo ideal y el real en cuanto a su eficiencia.

4.4 EFICIENCIA DE LA PLANTA.

A continuación se realizará un análisis del rendimiento, tanto de los equipos que integran la central, como de la central misma.

4.4.1 Eficiencia de la caldera. En las calderas se presentan normalmente las siguientes pérdidas de calor.

- Pérdidas con los productos de combustión que salen de la caldera.
- Pérdidas por la insuficiencia química de combustión.
- Pérdidas por la insuficiencia mecánica de combustión.
- Pérdida de calor en el medio circundante a través del revestimiento de la caldera y el aislante de los elementos no revestidos.

El mayor porcentaje de las pérdidas se debe a los gases que salen de la caldera a altas temperaturas, estas pérdidas se incrementan a medida que aumenta el exceso de aire y de temperatura de los gases evacuados.

La segunda causa de pérdida de calor, en magnitud, y por tanto en relevancia es la debida a la deficiencia mecánica del proceso de combustión, es decir, la que se produce debido al arrastre de partículas no quemadas de combustible con la ceniza, y su posterior eliminación con las escorias. Las pérdidas por esta causa son especialmente grandes en combustibles que contienen pocos volátiles y

debido a esto arden difícilmente, para los combustibles ricos en volátiles las pérdidas debidas a esta deficiencia son pequeñas.

Las pérdidas debidas a la insuficiencia química de combustión, relacionadas con la cantidad de aire mezclado con el combustible en el momento de la combustión, son insignificantes, especialmente para combustibles pobres en volátiles, y son aun menores las pérdidas de calor en el medio circundante que consisten en un intercambio de calor entre el sistema térmico y el medio ambiente, estas dependen de la potencia de vaporización de la caldera, disminuyendo de 0.7% con una productividad de 100 t/h, hasta 0.5% con 200 t/h.

Teniendo en cuenta lo anterior podemos determinar el rendimiento de la caldera a través de la siguiente expresión.

$$\eta_c = 100\% - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5)$$

Donde.

q_2 = Pérdidas con los productos de combustión que salen de la caldera.

q_3 = Pérdidas por la insuficiencia química de combustión.

q_4 = Pérdidas por la insuficiencia mecánica de combustión.

q_5 = Pérdida de calor en el medio circundante.

El rendimiento de las calderas modernas de alta producción de vapor que están operando actualmente en las centrales termoeléctricas, es muy satisfactorio, oscila entre 83% y 91% dependiendo entre otras variables del combustible utilizado. Esta característica se afecta considerablemente con el tamaño del equipo, el rendimiento de las calderas de pequeña producción de vapor, con hogares menos optimizados es considerablemente menor, aproximadamente 60%.

4.4.2 Eficiencia turbina - generador. En los cálculos de diseño y utilización de los turbogeneradores no es usual determinar la magnitud de las pérdidas aisladas

como en el caso de las calderas, en este caso se determinan por separado el rendimiento térmico, mecánico y eléctrico. El producto de estos tres factores nos indica el rendimiento global del grupo turbina - generador.

El rendimiento térmico esta constituido por la relación entre la cantidad de calor teóricamente utilizado en la turbina con respecto a la cantidad de calor que se le ha entregado, descontando la cantidad de calor que no hace trabajo en el proceso de expansión del vapor recalentado sobre la turbina y que es enviado al condensador, este rendimiento se refiere a la turbina ideal, que funciona sin pérdidas y que depende únicamente de los parámetros iniciales y finales del vapor y no de la construcción de la turbina o de su potencia.

Si tenemos en cuenta el rendimiento de un sistema térmico real de generación de vapor, se observa que el trabajo total W realizado por un sistema sobre un cuerpo consta de dos partes: en primer lugar el trabajo $p_0\Delta V$ efectuado contra la atmósfera, y en segundo lugar el cambio de energía libre de Gibbs (G) que es la parte de la energía de un sistema disponible para realizar máximo trabajo neto o útil isotérmico obtenido en un proceso reversible (distinto al de presión-volumen o trabajo de expansión) realizado sobre el cuerpo por el sistema y se indica por W_u (trabajo que se aprovecha) en contraposición con el trabajo *inútil* (aunque realizado por el sistema al expandirse contra la atmósfera circundante).

$$W(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2) = p_0\Delta V(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2) + W_u(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2)$$

Solo las reacciones espontáneas para las cuales la energía libre de Gibbs disminuye (ΔG) durante la reacción pueden hacer trabajo útil (que siempre es menor que el calor suministrado), y a medida que disminuye la energía libre en un proceso reversible, la capacidad de hacer trabajo va disminuyendo hasta que el sistema llega al equilibrio. En este estado ya el sistema no puede hacer trabajo útil y tanto los reactivos como los productos tienen la misma energía libre, $\Delta G = 0G$

$$G(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2) = F(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2) + pV(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2) = U(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2) + pV(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2) - TS(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2) = H(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2) - TS(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2)$$

$$\Delta G(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2) = \Delta H(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2) - T\Delta S(\text{Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2)$$

La entropía se entiende como una medida de desorden molecular de un sistema, una medida de la probabilidad termodinámica.

S = Entropía

$$S(\text{J}/^\circ\text{K}) = k \ln \omega = 2.303 k \log \omega$$

Donde:

$$k = R/N_0 = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Joules}/^\circ\text{K}$$

R = Constante de los gases

N₀ = Número de Avogadro.

$\omega = (T_2/T_1)$, hace referencia los diferentes arreglos microscópicos que corresponden a un estado macroscópico. Nos permite decidir cuanto más probable es un estado sobre otro. Aumenta para un cambio que es espontáneo y es mayor para una situación más probable que para una menos probable.

La entalpía (H) se entiende como la cantidad de energía de un sistema termodinámico que puede intercambiar con su entorno, y esta dada mediante la siguiente ecuación:

H=Entalpía

$$H (\text{J}) = U (\text{Joules}) + P(\text{N}/\text{m}^2) V (\text{m}^3)$$

Donde:

- U es la energía interna.
- P es la presión del sistema.
- V es el volumen del sistema.

Las unidades de la entalpía (H) se pueden expresar en joules, kilocalorías.

La entalpía total de un sistema no puede ser medida directamente; la variación de entalpía de un sistema en cambio sí puede ser medida. La variación de entalpía se define mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta H(\text{J}) = H_{\text{final}}(\text{J}) - H_{\text{inicial}}(\text{J})$$

- ΔH es la variación de entalpía.
- H_{final} es la entalpía final del sistema. En una reacción química, H_{final} es la entalpía de los productos.
- H_{inicial} es la entalpía inicial del sistema. En una reacción química, H_{inicial} es la entalpía de los reactivos.

ΔG = Al cambio de la energía libre del sistema.

ΔH = A los cambios de una función llamada entalpía o el calor transferido entre el sistema y el medio que lo rodea.

T = Temperatura absoluta ($t \text{ } ^\circ\text{C} + 273 \text{ } ^\circ\text{K}$).

ΔS = Cambios de entropía, es un término que expresa el grado de desorden en un sistema.

Δ = Se refiere al valor final menos el valor inicial.

Los cambios de entalpía o cambios en el contenido calórico ΔH se definen de la siguiente manera:

ΔH = Cambio de entalpía

$$\Delta H = \Delta E + \Delta PV$$

ΔE = Es el cambio en la energía total del sistema.

P = Presión.

V = Volumen.

La variable S (entropía) o energía degradada es una propiedad que depende del estado del sistema, que desempeña un papel primordial en la teoría de las máquinas térmicas y en particular en dar una respuesta a una pregunta de índole estrictamente práctica, la máxima fracción de calor convertible en trabajo útil.

$$\Delta S - \frac{\Delta E + p_0 \Delta V}{T_0} \geq 0$$

ΔE = Es el cambio en la energía total del sistema.

$p_0 \Delta V$ = Trabajo efectuado contra la atmósfera

ΔS (kJ/°K) = Q/T_0 (kJ/°K) o (kcal/°k)

$$\Delta S = S_2 - S_1 = C_v \ln(T_2/T_1)$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 = C_p \ln(T_2/T_1)$$

C_v = capacidad calorífica a volumen constante

C_p = capacidad calorífica a presión constante

$$T_0 \Delta S \geq \Delta E + W$$

Por lo tanto en un cambio bien definido en un medio ambiente dado, el máximo trabajo útil que puede realizar el sistema se obtiene en un cambio reversible y está dado por la disminución correspondiente de la disponibilidad.

$$W_u \leq -(\Delta E + p_0 \Delta V - T_0 \Delta S) = -\Delta$$

Al analizar un caso real encontramos que el rendimiento térmico en una turbina de vapor, se incrementa en la medida en que los parámetros iniciales de presión y temperatura del vapor aumentan. Esto se explica por el hecho de que la elevación

de los parámetros de entrada va acompañada por la simultánea elevación de la entalpía inicial del vapor y de la disminución de la entalpía final de este a la salida de la turbina. Estos hechos conducen a un aumento del rendimiento.

El rendimiento relativo interior η_{ri} de la turbina tiene en cuenta las pérdidas interiores en el equipo, las originadas por el roce de los discos sobre el vapor, las de ventilación, los escapes de vapor a través de las holguras, las pérdidas en las directrices y paletas, las pérdidas debidas a la humedad del vapor y a la velocidad de salida.

El rendimiento mecánico de la turbina tiene en cuenta todas las pérdidas exteriores: la fricción en los cojinetes, las pérdidas de vapor a través de las juntas finales, el gasto de energía para el accionamiento del regulador y de la bomba de aceite.

El rendimiento eléctrico o del generador η_g esta dado por la relación entre la cantidad de energía generada respecto a la cantidad de energía en el eje de la turbina. Esta relación permite dimensionar las pérdidas que se presentan en el generador fundamentalmente representadas por: la disipación de calor debida a la circulación de la corriente por los devanados del rotor y estator y las perdidas mecánicas (cojinetes, rozamiento con el aire) entre otras.

En general el rendimiento térmico, mecánico y eléctrico del grupo turbina - generador se incrementa en la medida en que la potencia de los equipos aumenta.

4.4.3 Eficiencia de la central termoeléctrica. El rendimiento de la central termoeléctrica es la relación de la cantidad de energía generada respecto a la cantidad de energía que contiene el combustible utilizado en la central. Para el cálculo del rendimiento de la central se deben tener en cuenta las pérdidas de calor en el recorrido desde la caldera hasta la turbina y desde la turbina hasta la caldera.

Teniendo esto en cuenta, el rendimiento de la central estará representado por la siguiente expresión.

$$\eta_{\text{central}} = \eta_c \times \eta_{\text{cv}} \times \eta_{\text{tg}}$$

Donde:

η_{central} = Rendimiento central

η_c = Rendimiento caldera

η_{cv} = Rendimiento conducción de vapor

η_{tg} = Rendimiento grupo turbina - generador.

El rendimiento típico de los equipos que integran una central térmica pequeña, es decir con capacidad menor a 10 MW se muestra en la tabla 21.

Tabla 21. Eficiencia de los equipos de la central térmica.

EQUIPO	EFICIENCIA
CALDERA	60 %
TUBERÍA CONDUCCIÓN	98 %
TURBOGENERADOR	46 %

Fuente: Introducción a las centrales térmicas, G. Y. Jolodovski, Barcelona, 1973.

A partir de esta información podemos determinar la eficiencia de la planta para el aprovechamiento de los aceites lubricantes regenerados, mediante el siguiente calculo.

$$\eta_{\text{central}} = \eta_c \times \eta_{\text{cv}} \times \eta_{\text{tg}}$$

$$\eta_{\text{central}} = 0.6 \times 0.98 \times 0.46$$

$$\eta_{\text{central}} = 0.27$$

La eficiencia calculada para la central térmica es del 27%.

4.5 DIMENSIONAMIENTO.

A continuación se realizará el análisis necesario para determinar el tamaño de la central y sus equipos.

4.5.1 Energía contenida en el combustible. El combustible que será empleado en la central, es resultado de la mezcla entre aceite usado regenerado en una proporción del 69% y ACPM en una proporción de 31%, el producto de esta combinación es un combustible con características similares a un fuel - oil N° 2⁴³. Este es un aceite destilado que se utiliza con frecuencia para generación de calor en equipos que no tengan requerimientos especiales de combustible, tipo queroseno o de inferior calidad tipo Fuel Oil.

El poder calorífico del combustible es de 40 MJ/kg ó 9553.8 kcal/kg ó 17196.84btu/lb, este poder calorífico expresa el potencial energético contenido en la mezcla por kg, entonces el potencial total se obtiene al resolver la siguiente formula.

$$E \left[\frac{kWh}{día} \right] = CC \left[\frac{kg}{día} \right] \times PCI \left[\frac{kcal}{kg} \right] \times 1 \left[\frac{kWh}{859.86kcal} \right]$$

Donde.

- E=Energía (Kcal/Kg)
- CC=Cantidad de combustible en (kg / día)
- PCI=Poder calorífico inferior (Kcal/Kg)

Según lo expuesto en el capítulo 3, el potencial de recuperación del residuo es de aproximadamente 4'500.000 galones anuales ó 12.330 galones diarios en Bogotá; La empresa LAHCORP (Latinamerican Hydrocarbon Corporation S. A.) ya realiza un proceso de acondicionamiento de aceite lubricante usado con una capacidad de 5.000 Gal. / Día, por lo tanto el volumen que aun no se dispone correctamente es de 7.330 Gal. / Día ó 2'675.450 Gal. / Año aproximadamente.

⁴³ Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001.

La evaluación financiera en consonancia con el estudio de mercado realizado por la firma Lupien Rosenberg, arrojó como resultado la capacidad instalada de una planta tipo, capaz de procesar 2.5⁴⁴ millones de galones anuales, según este estudio realizado para la UPME, esta planta cubriría la oferta existente del residuo en la ciudad capital.

El volumen de aceite regenerado es menor respecto a la cantidad de aceite usado recuperado que ingresa a la planta, esto se debe a la separación de los componentes que debe realizarse para que deje de ser considerado como un residuo peligroso. El factor de rendimiento es de 0.8. Por lo tanto el volumen de aceite regenerado disponible será:

Aceite regenerado disponible = 2'500.000 Gal. x 0.8 = 2'000.000 Gal. / año.

Es importante recordar que el combustible a utilizar es el resultado de la mezcla entre el aceite regenerado y el DIESEL en una proporción de 69% y 31% respectivamente, por lo tanto la cantidad de combustible disponible será:

$$\text{Combustible disponible} = \frac{2'000.000}{0.69} = 2'898.550 \text{ Gal.}$$

Aproximadamente 2'900.000 galones al año. Considerando que cada galón tiene aproximadamente 3.64 kg entonces:

Combustible disponible en kg / Año = 2'900.000 Gal. x 3.64 kg / Gal. = 10'556.000 kg / año, lo que significa que la disponibilidad del combustible es de 28.920 kg / día.

Entonces:

⁴⁴Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Lupien Rosenberg Et Associés, Octubre de 2001.

$$E \left[\frac{kWh}{día} \right] = 28.920 \left[\frac{kg}{día} \right] \times 9553.8 \left[\frac{kcal}{kg} \right] \times 1 \left[\frac{kWh}{859.86kcal} \right]$$

$$E = 321.326 \frac{kWh}{día}$$

4.5.2 Capacidad de generación de energía eléctrica a partir del combustible.

El factor de planta (f.p.) estimado es de 0.8, esto es equivalente a 7.008 horas de trabajo al año de las 8760 horas disponibles.

De la siguiente expresión podemos determinar la potencia eléctrica que es capaz de desarrollar el combustible.

$$E \left[\frac{kWh}{día} \right] = P[kW] \times 24 \left[\frac{h}{día} \right] \times f.p.$$

$$P[kW] = \frac{E \left[\frac{kWh}{día} \right]}{24 \left[\frac{h}{día} \right] \times f.p.}$$

$$P[kW] = \frac{321.326 \left[\frac{kWh}{día} \right]}{24 \left[\frac{h}{día} \right] \times 0.8}$$

$$P[kW] = 16.735.72kW$$

Ahora recordemos que la eficiencia de la planta es de $\eta = 27\%$, teniendo esto en cuenta podemos determinar la potencia eléctrica que desarrolla la central.

$$P = 16.735 \text{ MW} \times 0.27$$

$$P = 4.518 \text{ MW}$$

4.5.3 Características de los equipos de planta. Los cálculos y definiciones que a continuación se presentan nos permitirán conocer el tamaño de la central.

4.5.3.1 Características del generador. En generadores de baja capacidad es típico encontrar un factor de potencia bajo, por lo general $\cos \phi = 0.8$, de acuerdo con esto la capacidad del generador será:

$$P_G = \frac{4.518MW}{0.8}$$

$$P_G = 5.6475 \text{ MVA}$$

A continuación se enuncian las características de la planta, estas obedecen a valores típicos de una central térmica de generación de energía eléctrica, excepto la potencia.

Potencia 6 MVA

Cos ϕ 0.80

Velocidad 3600 r.p.m.

Frecuencia 60 Hz.

4.5.3.2 Características del transformador principal. El transformador principal de una central eléctrica hace referencia al equipo que eleva el nivel de tensión desde el valor de generación, hasta un valor admisible para la transmisión de la energía. En centrales térmicas el transformador principal debe soportar aproximadamente el 81% de la energía generada.

Por lo tanto:

$$T_1 = 6 \text{ MVA} \times 0.81$$

$$T_1 = 4.86 \text{ MVA}$$

Las características para el transformador principal serán:

Potencia 5 MVA.

Cos ϕ 0.9 Valor típico.

4.5.3.3 Características del transformador de servicios auxiliares. Una central generadora debe proveer la energía para alimentar sus propios servicios auxiliares, estos están integrados entre otros por:

- Alimentación de los sistemas de control.
- Alimentación de los sistemas de protecciones.

Resistencias de calefacción para evitar condensación en las celdas de control y protecciones.

- Iluminación.

El porcentaje de energía que requieren estos servicios para el caso de una central térmica es normalmente de 19%.

Por lo tanto:

$$T_2 = 6 \text{ MVA} \times 0.19$$

$$T_2 = 1.14 \text{ MVA}$$

La característica para el transformador de servicios auxiliares será:

Potencia 2 MVA.

4.5.4 Energía disponible para la venta. Es importante tener en cuenta que la potencia de una central generadora se entiende en bornes de alta tensión del transformador principal.

Por lo tanto:

$$E(\text{MWh} / \text{Año}) = \text{MVA} \times \text{Cos } \phi \times \text{f.p.} \times 8760\text{h}$$

De acuerdo con esto la energía que esta en capacidad de despachar la central depende de la potencia en bornes del transformador principal, el factor de potencia del transformador principal, el factor de planta y el número de horas que tiene en un año.

$$E(\text{MWh} / \text{Año}) = 5 \text{ MVA} \times 0.9 \times 0.8 \times 8760\text{h}$$

$$E(\text{MWh} / \text{Año}) = 31.536 \text{ MWh} / \text{Año}$$

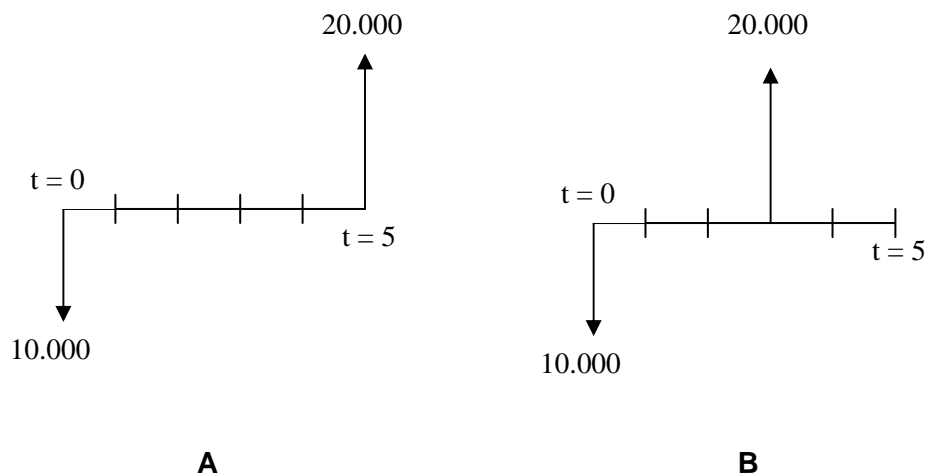
5 EVALUACIÓN ECONÓMICA.

5.1 INTRODUCCIÓN.

Haciendo uso de las herramientas existentes para el análisis de proyectos, desarrollaremos los diferentes criterios para definir la conveniencia de realizar inversiones en la utilización de los aceites usados en la generación de energía eléctrica. A continuación se realizará una breve descripción de dichas herramientas, y se desarrollara el análisis del proyecto.

5.1.1. Costo de oportunidad del dinero. Para establecer el concepto de Costo de oportunidad del dinero recurramos al siguiente ejemplo:

Figura 22. Representación gráfica flujo de caja.



Fuente: Evaluación financiera de proyectos de inversión, Karen Marie Mokate, Bogotá, 1998.

Consideremos dos proyectos propuestos para ser ejecutados en una región del país en donde no hay inflación, cuyos flujos de fondos se representan en la figura 1. Los costos de los dos proyectos son iguales y ocurren en el mismo momento, mientras que los ingresos aunque son iguales, ocurren en tiempos diferentes.

Mientras que en el proyecto (A) los ingresos por \$ 20.000 se dan en el periodo 5, en el proyecto (B) los mismos \$ 20.000 se dan en el periodo 3.

De invertir en el proyecto (B) los \$ 20.000 de ingresos en el tercer periodo podrían ser invertidos en un nuevo proyecto o en el mercado financiero, y al termino de los 5 periodos los ingresos serian mas de \$ 20.000.

En este caso la comparación es sencilla, sin embargo no se ha contestado la pregunta sobre la rentabilidad del proyecto (B). ¿Vale la pena invertir \$10.000 en el periodo cero para recibir \$ 20.000 en el periodo 3? Responder a esta pregunta exige reconocer que la decisión de invertir en el proyecto conduce a no poder utilizar los \$10.000 en otra alternativa durante un tiempo, por lo tanto para que sea rentable, el proyecto tiene que generar como mínimo lo que habría ganado la inversión más atractiva. Es decir como mínimo debe compensar el costo de oportunidad del dinero.

5.1.2. Tasa de Interés de Oportunidad (TIO). Es la tasa que refleja el costo de oportunidad de los dineros del inversionista. Constituye la tasa de rendimiento con la cual se compararán los resultados de los proyectos de inversión. Se podría considerar que cualquier proyecto de inversión compite con la alternativa de ubicar los fondos de inversión en el mercado financiero, donde ganaría una tasa de interés. Al invertir en un proyecto, el inversionista sacrifica la oportunidad de ganar la tasa de interés i , en el mercado financiero. Por tal motivo, esta tasa podría representar el costo de oportunidad del dinero invertido en el proyecto.

Sin embargo, seria equivocado decir que el costo de oportunidad del dinero esta necesariamente reflejado por la tasa de interés financiera. La tasa de oportunidad será aquella que represente el rendimiento de las alternativas de inversión que se podrían seleccionar si se pudiera no invertir en el proyecto.

Es importante tener en cuenta que la tasa de oportunidad es particular de cada inversionista. En la medida en que haya varios inversionistas para un proyecto,

puede haber también varias evaluaciones financieras, cada una de ellas desde un determinado punto de vista. Por lo tanto cada uno compara el proyecto desde su propia tasa de interés de oportunidad.

5.1.3 Flujo de caja. Forma sistemática de organizar los ingresos y egresos de un proyecto para poder evaluar su viabilidad financiera o económica. La información se registra periodo a periodo y se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Periodicidad: Depende de la naturaleza del proyecto (meses, trimestres, semestres).
- Vida útil: Tiempo durante el cual se generan los beneficios para los cuales fue realizado el proyecto.
- Periodo cero: Momento en el que se realiza invierte el primer peso.

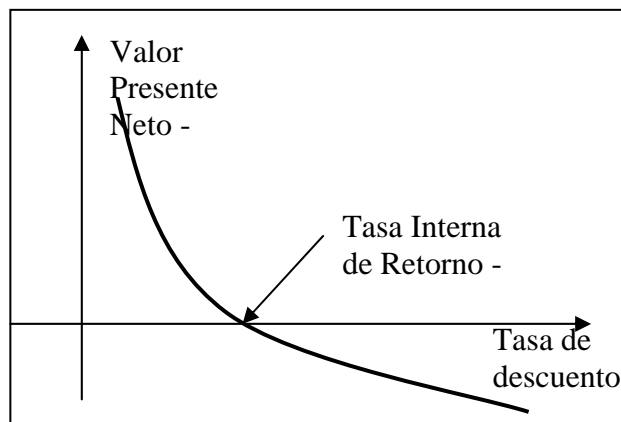
5.1.4 Valor Presente Neto (VPN). El Valor Presente Neto es un criterio financiero para el análisis de proyectos de inversión que consiste en determinar el valor actual de los flujos de caja que se esperan en el transcurso de la inversión, tanto de los flujos positivos (típicamente ingresos) como de las salidas de capital (típicamente costos incluyendo la inversión inicial), donde éstas se representan con signo negativo, mediante su descuento a una tasa o costo de capital adecuado al valor temporal del dinero y al riesgo de la inversión.

El Valor Presente Neto es muy utilizado por dos razones, la primera porque es de muy fácil aplicación y la segunda porque todos los ingresos y egresos futuros se transforman a pesos de hoy o de un momento definido en el tiempo y así puede verse, fácilmente, si los ingresos son mayores que los egresos. Cuando el VPN es menor que cero implica que hay una pérdida a la tasa de descuento con que se evaluó el VPN. Por el contrario si el VPN es mayor que cero se presenta una ganancia. Cuando el VPN es igual a cero se dice que el proyecto es indiferente.

El Valor Presente Neto representa hoy o en el momento para el que se calcule, la diferencia total de los ingresos menos los egresos futuros del proyecto en consideración.

Una condición indispensable para comparar alternativas, es que siempre se tome en la comparación igual número de años, pero si el tiempo de cada uno es diferente, se debe tomar como base el mínimo común múltiplo de los años de cada alternativa. El VPN disminuye a medida que aumenta la tasa de descuento o interés, como lo muestra la figura 7.

Figura 23. VPN Vs. Tasa de descuento o interés.



Fuente: <http://www.virtual.unal.edu.co>

Al evaluar proyectos con la metodología del VPN, algunos autores (CITAR FUENTE) recomiendan que se calcule con una tasa de interés superior a la Tasa de Interés de Oportunidad (TIO), con el fin de tener un margen de seguridad para cubrir ciertos riesgos, tales como liquidez, efectos inflacionarios o desviaciones que no se tengan previstas.

5.1.5 Tasa Interna de Rentabilidad o de Retorno. Generalmente conocida por su acrónimo TIR. Este criterio corresponde a la máxima tasa de interés de oportunidad a la cual el proyecto será aceptable. La tasa interna de retorno,

representa el “valor crítico” de la tasa de interés de oportunidad, por lo tanto el problema se reduce a determinar la tasa de descuento o de interés para la cual el valor presente neto del proyecto se hace igual a cero, como se presenta en la figura 23.

La utilización de la TIR se basa en su comparación con la tasa de interés de oportunidad del dinero. El análisis se reduce a evaluar si la tasa relevante es mayor o menor que el valor de la TIR. La tasa interna de retorno como herramienta de decisión para el proyecto en la etapa de inversión, se puede interpretar de la siguiente forma:

- Sí $TIR > i_{OP}$; el proyecto es atractivo y puede ser ejecutado.
- Sí $TIR = i_{OP}$; el proyecto es indiferente.
- Sí $TIR < i_{OP}$; no es conveniente la realización del proyecto, ya que existen otras alternativas de inversión que arrojan mayores beneficios.

Como criterio estándar para la evaluación, algunos autores como Leonardo Calle⁴⁵ recomiendan la utilización combinada del VPN y de la TIR, con el fin de determinar la viabilidad financiera y/o económica de los proyectos de inversión.

5.2 COSTO DE RECUPERACIÓN Y REGENERACIÓN DE LOS ACEITES USADOS.

El estudio realizado por Lupien Rosenberg para la UPME⁴⁶, determinó una capacidad instalada de 2'500.000 Gal / año para la planta de tratamiento de los aceites usados, este volumen es igual al definido por el presente estudio para su planta de regeneración, por lo tanto utilizaremos las conclusiones del análisis financiero, que evaluó el proceso desde la recuperación del residuo, hasta la obtención del combustible.

⁴⁵ Calle, L. “Tecnologías e impactos ambientales del carbón”. Especialización en gestión energética y ambiental. Universidad de la Salle. Bogotá. 2002.

⁴⁶ Lupien Rosenberg Et Asociés. Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia; Octubre de 2001.

Este análisis consideró dos alternativas en cuanto a la recuperación del residuo, la primera incluye la compra y acondicionamiento de cuatro vehículos para realizar la recolección en sitio, la segunda propone que el residuo se reciba en las puertas de la planta, lo que implica que los vehículos no se necesiten. En la tabla N° 19. se muestran los resultados del análisis.

Tabla 22. Indicadores financieros planta de tratamiento aceites usados.

INDICADORES	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2
Valor presente neto M \$	702.14	1.254.92
TIR Real %	33.10	43.64
Período de repago (PAYBACK) Años	4.05	3.14
Inversión inicial M \$	1.447.31	1.051.31

Fuente: Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión, UPME, 2001.

Comparando los indicadores de estas dos alternativas podemos determinar como la más atractiva el escenario 2, pues el valor presente neto es mayor en este caso al igual que la TIR, e incluso para alcanzar estas condiciones la inversión es menor respecto a la del escenario 1.

Entonces la inversión para la planta de tratamiento del residuo será de \$ 1.051'310.000. Convirtiendo esta cantidad a dólares con la tasa representativa del mercado del 14 de mayo de 2005 equivalente a \$ 2.348.69 por dólar.

La inversión en dólares sería de USD 447.615.47

5.3 INVERSIÓN.

Tabla 23. Inversión en la obra civil.

INVERSIÓN EN LA OBRA CIVIL		
CONCEPTO	PORCENTAJE	DÓLARES
TERRENO	28.1% *	385,460.24
OBRAS PRELIMINARES	6.3% *	86,084.29
CENTRAL	17.3% *	237,280.11
EDIFICIOS AUXILIARES	9.6% *	132,005.05
ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS	12.8% *	176,006.74
SERVICIOS	2.3% *	32,075.99
IMPREVISTOS	9.4% *	128,441.06
SUBTOTAL	100.0% *	1,370,768.99

(*) Fuente: Introducción a las centrales térmicas, G. Y. Jolodouski, Barcelona, 1973

Los costos de la refinación del aceite usado están contemplados en los costos de operación y mantenimiento que se encuentran en la página 137 tabla 28.

Tabla 24. Inversión equipo mecánico.

INVERSIÓN EQUIPO MECÁNICO		
CONCEPTO	PORCENTAJE	DÓLARES
CALDERA	22.7%	1,913,333.98
EQUIPOS AUXILIARES	22.5%	1,901,449.92
MONTAJE	8.8%	742,753.88
TURBO GRUPO	24.9%	2,099,517.62
SERVICIOS	1.1%	96,062.83
CONTROL DE EMISIONES	6.6%	559,541.25
ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA	1.9%	164,396.19
IMPREVISTOS	6.2%	521,908.39
PLANTA DE ACONDICIONAMIENTO DE ACEITE USADO.	5.3%	447,615.47
SUBTOTAL	100.0%	8,446,579.53

Fuente: Introducción a las centrales térmicas, G. Y. Jolodouski, Barcelona, 1973

Tabla 25. inversión equipo eléctrico.

INVERSIÓN EQUIPO ELÉCTRICO		
CONCEPTO	PORCENTAJE	DÓLARES
GENERADOR	29.8%	523,318.04
TRANSFORMADORES	30.8%	541,393.75
COMUNICACIONES	11.7%	204,799.51
SUBESTACIÓN	21.2%	372,043.68
GASTOS GENERALES	1.0%	17,022.75
IMPREVISTOS	5.5%	96,520.77
SUBTOTAL	100.0%	1,755,098.50

Fuente: Introducción a las centrales térmicas, G. Y. Jolodouski, Barcelona, 1973

Tabla 26. Inversiones directas.

INVERSIONES DIRECTAS		
CONCEPTO	PORCENTAJE	DÓLARES
CONSULTORIA	19.1%	32,289.27
	80.9%	136,924.80
SUBTOTAL	100.0%	169,214.07

Fuente: Introducción a las centrales térmicas, G. Y. Jolodouski, Barcelona, 1973

Tabla 27. Inversión Total

TOTAL INVERSIÓN		
CONCEPTO	PORCENTAJE	DÓLARES
INVERSIÓN EN LA OBRA CIVIL	11.7%	1,370,768.99
INVERSIÓN EQUIPO MECÁNICO	71.9%	8,446,579.53
INVERSIÓN EQUIPO ELÉCTRICO	14.9%	1,755,098.50
INVERSIONES DIRECTAS	1.4%	169,214.07
TOTAL	100.0%	11,741,661.09

Fuente: Introducción a las centrales térmicas, G. Y. Jolodouski, Barcelona, 1973

La inversión necesaria para construir toda la planta termoeléctrica incluyendo la planta de acondicionamiento del residuo es de 11'741.661.09 dólares. Este costeo se baso en los datos porcentuales de kWh instalado proporcionados por la (UPME) Unidad de Planeación Minero Energética, a través del plan energético nacional entre el 2003 y el 2020, el plan de expansión de referencia y sus funcionarios.

5.3.1 Costo de operación y mantenimiento. Estos costos varían en forma representativa dependiendo de las características de la planta. La mano de obra

es lo más representativo y depende de factores locales. Se ha determinado que el costo operacional es aproximadamente el 20% de los ingresos por venta de energía y es inversamente proporcional al tamaño de la planta.

5.4. INGRESOS

Los ingresos anuales se calculan a partir de:

- La cantidad de energía que puede despachar la planta al año, este parámetro fue calculado en el capítulo cuatro y hace a 31.536 MWh / Año.
- El valor del kWh es de \$71.44 precio promedio de bolsa. Tomado de la página Web de ISA⁴⁷ último registro existente día 14 de Mayo de 2005.

Basados en los anteriores datos podemos estimar los ingresos anuales así:

Ingresos anuales = 31'536.000 kWh / Año X 71.44 \$ / kWh = \$ 2.252'931.840

Esta cantidad convertida en dólares con la tasa representativa del mercado del 14 de mayo de 2005 equivalente a \$ 2.348.69 por dólar.

Ingresos en dólares = U\$ 959.229.11

5.5. EVALUACIÓN ECONOMICA DEL PROYECTO.

El comportamiento del precio de la energía eléctrica se calculó basado en el valor estimado en el plan energético nacional entre el 2003 y el 2020, este documento es publicado por la (UPME) Unidad de planeación Minero Energética.

La tasa de interés mencionada en el flujo se refiere a la tasa de inflación anual, se estima un 7% anual.

El tiempo de evaluación típico para un proyecto de generación de estas características es de 20 años.

⁴⁷ <http://www.isa.com.co>

Figura 24. Grafica flujo de caja.

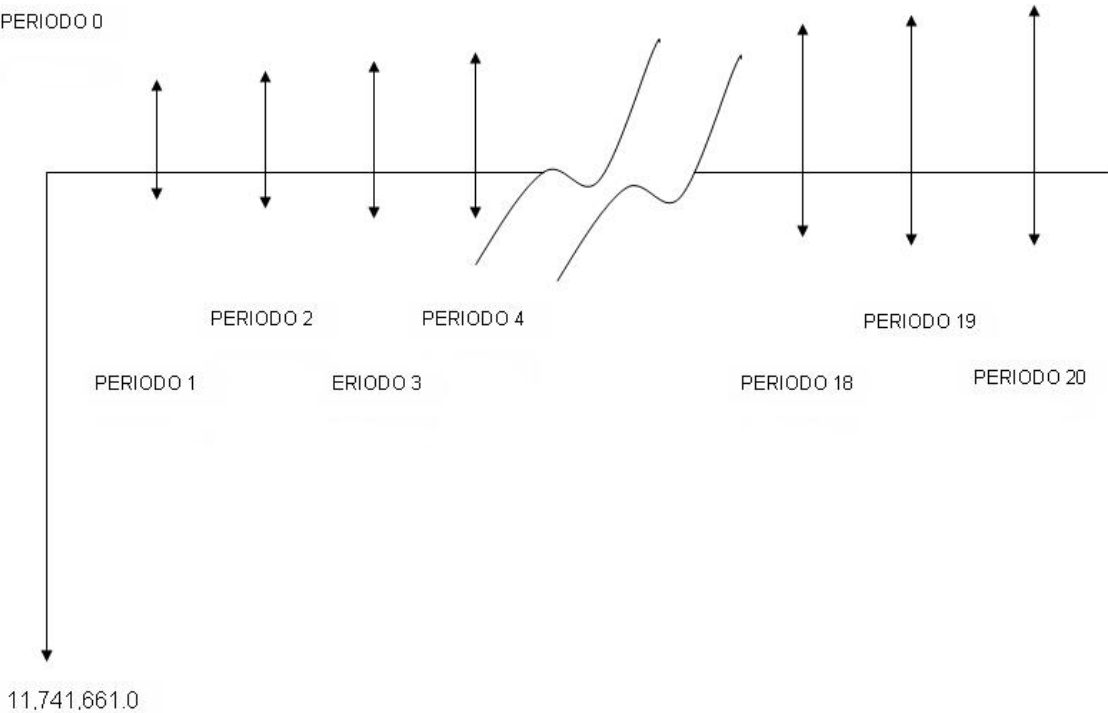


Tabla 28. Evaluación Económica del Proyecto periodo 0-5

EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO						
	PERIODO 0	PERIODO 1	PERIODO 2	PERIODO 3	PERIODO 4	PERIODO 5
INGRESOS						
Venta de energía	\$ 0	\$ 996.538	\$ 958.694	\$ 920.851	\$ 946.080	\$ 983.923
EGRESOS						
Inversión	\$ -11.741.661					
Operación y mantenimiento		\$ -199.308	\$ -191.739	\$ -184.170	\$ -189.216	\$ -196.785
FLUJO NETO	\$ -11.741.661	\$ 797.230	\$ 766.956	\$ 736.681	\$ 756.864	\$ 787.139
TIEMPO DE EVALUACIÓN	20 AÑOS					
TASA DE INTERÉS	7.00%					
BP EN EL PERIODO 0 AÑOS POR AÑO	\$ -11.741.661	\$ 745.075	\$ 669.889	\$ 601.351	\$ 577.408	\$ 561.219
VPN	\$ -3.127.445					
TIR	-3%					
Los valores mostrados en la tabla se expresan en dólares						

Tabla 29 Evaluación Económica del Proyecto periodo 6-13

EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO							
PERIOD6	PERIODO 7	PERIODO 8	PERIODO 9	PERIODO10	PERIOD11	PERIOD12	PERIODO 13
\$ 996.538	\$ 1.009.152	\$ 1.034.381	\$ 1.034.381	\$ 1.059.610	\$1.072.224	\$ 1.072.224	\$1.072.224
\$-199.308	\$ -201.830	\$ -206.876	\$ -206.876	\$ -211.922	\$ -214.445	\$ -214.445	\$ -214.445
\$ 797.230	\$ 807.322	\$ 827.505	\$ 827.505	\$ 847.688	\$ 857.779	\$ 857.779	\$ 857.779
\$ 531.228	\$ 502.759	\$ 481.615	\$ 450.108	\$ 430.921	\$ 407.525	\$ 380.864	\$ 355.948
Los valores mostrados en la tabla se expresan en dólares							

Tabla 30.Evaluación Económica del Proyecto periodo 14-20

EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO						
PERIODO 14	PERIODO 15	PERIODO 16	PERIODO 17	PERIODO 18	PERIOD 29	PERIODO 20
\$ 1.072.224	\$ 1.072.224	\$ 1.072.224	\$ 1.072.224	\$ 1.072.224	\$ 1.072.224	\$ 1.072.224
\$ -214.445	\$ -214.445	\$ -214.445	\$ -214.445	\$ -214.445	\$ -214.445	\$ -214.445
\$ 857.779	\$ 857.779	\$ 857.779	\$ 857.779	\$ 857.779	\$ 857.779	\$ 857.779
\$ 332.662	\$ 310.899	\$ 290.559	\$ 271.551	\$ 253.786	\$ 237.183	\$ 221.666
Los valores mostrados en la tabla se expresan en dólares						

El valor presente neto se calculó de acuerdo a la formula descrita a continuación.

$$P = \frac{S}{1 + i \frac{1}{100} * n}$$

Donde:

P capital inicial

S capital final

i tasa de interés

n período (tiempo transcurrido desde la fecha de vencimiento hasta la fecha de cálculo).

La tasa interna de retorno se calculó de acuerdo a la formula descrita a continuación.

$$-I_0 (1+\text{tasa interna de retorno})^2 + A_1 (1+\text{tasa interna de retorno}) + A_2 = 0$$

6 . CONCLUSIONES

- La utilización de aceites lubricantes usados acondicionados, en procesos de generación de energía eléctrica es técnicamente viable, las características del residuo, los procesos y tratamientos que se han desarrollado y que se encuentra disponibles en documentos oficiales lo hacen posible.
- El análisis económico revela la inconveniencia de realizar una inversión en el desarrollo de una planta de generación de energía eléctrica utilizando los aceites lubricantes usados como combustibles. Colombia es un país con un gran recurso hídrico para la generación de energía eléctrica esto hace que los precios de la energía sean bajos respecto a otros países cuya demanda energética se suple en mayor porcentaje utilizando otras tecnologías.
- Los aceites usados, residuo que aun representan un problema para las personas y el medio ambiente en nuestro país, pueden ser recuperados y tratados para utilizarlos en diversas aplicaciones. Estas prácticas se han implementado con éxito en otras naciones gracias a sus procesos de investigación. En el mundo los líderes de estos desarrollos se concentran en la Comunidad Europea.
- Los esfuerzos de la Comunidad Europea están orientados hacia la regeneración del residuo para devolverle sus características lubricantes. Aunque hoy existen otras aplicaciones la comunidad que ha generado mayores avances tecnológicos en el tema reconoce a través de su legislación que la regeneración genera los más óptimos beneficios económicos y ambientales para sus naciones.
- En Colombia se consideró la posibilidad de la regeneración para utilizar los aceites usados tratados nuevamente como lubricantes, esta alternativa fue desechada rápidamente. Esto debido principalmente a que los líderes en la búsqueda de soluciones en Colombia han sido las empresas productoras e

importadoras de lubricantes por disposición de la legislación nacional. Estas empresas se negaron a apoyar la creación de una organización que sería competencia directa de sus productos.

- El aceite usado es un residuo que ya tiene un mercado creado y aun cuando las aplicaciones actuales están prohibidas no puede ignorarse su existencia.
- Los aceites usados por sus características, no son aptos para ser utilizados como combustible en motores de combustión interna, aún sometiéndolos al tratamiento físico-químico descrito en la evaluación técnica para eliminar impurezas y contaminantes, ya que su viscosidad y enlaces de fuerte cohesión, dañarían internamente el motor bloqueando sus sistemas y desgastando sus partes. Por otro lado no contamos con un estudio oficial que nos describa un proceso que permita obtener un combustible apto para utilizarlo en motores de combustión interna.
- El potencial de generación de aceite lubricante usado en la ciudad de Bogotá es de 4'500.000 galones al año.
- La empresa LAHCORP realiza actualmente un proceso de acondicionamiento muy similar al expuesto por el documento oficial del estudio realizado por Lupien Rosenberg Et Associés y publicado también por el DAMA en el documento "Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión". Esta empresa tiene la capacidad de tratar 1'824.550 Gal. / año, por lo tanto el volumen que aun no se dispone correctamente es de 2'675.450 Gal. / año aproximadamente.
- Además de LAHCORP existen otras empresas que están desarrollando con sus propios recursos, investigaciones y procesos diferentes para dar un correcto uso final al residuo, sin embargo su actual capacidad no es lo suficientemente importante para causar una variación importante a este estudio, por lo tanto no los hemos tenido en cuenta para evitar distorsionar los cálculos con información no oficial.

7 . RECOMENDACIONES

- Las instituciones gubernamentales encargadas de preservar el medio ambiente de los colombiano deben ejercer un mayor control al cumplimiento de las leyes que regulan el destino final y los tratamientos a los que deben ser sometidos los desechos reciclables, haciendo especial énfasis en los aceites usados por el alcance destructivo de que es capaz tanto para el medio ambiente como para la salud de las personas cuando se desecha de forma incorrecta.
- Se requiere mayor apoyo por parte del estado colombiano, para aquellos que tienen la iniciativa de llevar a cabo proyectos de investigación y desarrollo para transformar residuos peligrosos en productos aptos para reingresar a la cadena productiva mejorando el medio ambiente de los colombianos y generando nuevas alternativas de productividad y competitividad.
- Estimular investigaciones para determinar el impacto económico y social para el país, al incorporar al aceite usado regenerado para ser utilizado nuevamente en sus diferentes aplicaciones como lubricante.

BIBLIOGRAFÍA

BABCOCK Y WILCOX. Steam.

CAICEDO, Richard Amilcar. Guía para el manejo de los aceites usados generados en la industria y el sector automotriz. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Ubicación - Referencia Universidad de la Salle sede centro. Bogotá, 02 de Noviembre 2001.

CENTRO DE ACTIVIDADES REGIONALES PARA LA PRODUCCIÓN LIMPIA (CAR/PL). Posibilidades de Reciclaje y Aprovechamiento de los Aceites Usados, Barcelona (España), publicación 2000.

CONCAWE. Collection and disposal of used lubricating Oils. Report 5, 1996.

COMISIÓN EUROPEA. Directiva 87/101/CEE.

DAMA. Manual de normas y procedimientos para la gestión de aceites usados. Bogotá, Agosto de 2003.

DE NEVERS, Noe. Ingeniería de control de la contaminación del aire, Mc Graw Hill, 2000.

DONALD E., Richards. Termodinámica, Mc Graw Hill, 2001.

FORZATTI, P y LIETTI, L. Heterogeneous Chemistry Reviews, 3 (1996) 33-51. 3. Japan Patent 52039569 Mitsubishi Petrochemical Ind. (1969).

GS ENVIRONMENT INC y LUPIEN ROSENBERG ET ASOCIES. Colombia Ltda. Montreal, Estudio sobre el manejo de los aceites usados en Colombia, diciembre de 1999.

JOLODOUSKI, G. Y. Introducción a las Centrales Térmicas, Barcelona, 1973.

LUPIEN ROSENBERG ET ASOCIES. Utilización de los aceites usados como combustibles en Colombia, Octubre de 2001.

MARTÍNEZ, Diego Alejandro y GUACANEME, Jorge Eduardo. Proyecto de prototipos control automatizado de inyección de aceite usado para la alimentación de hornos. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería de diseño y Automatización Electrónica. Ubicación - Referencia Universidad de la Salle sede centro. 9 de noviembre de 1999.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Manual de auditorias Energéticas 1989.

MOKATE, Karen Marie. Evaluación financiera de proyectos de inversión, Bogotá, 1998.

PERE EZQUERRA, Pizá. Dispositivos y sistemas para el ahorro de energía, Marcombo S.A., 1988.

PINZÓN, Olga Yolanda. Programa piloto para el manejo integral de los aceites usados en la gran industria y concesionarios de la localidad de Puente Aranda. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Ubicación - Referencia Universidad de la Salle sede centro. Bogotá, 04 de mayo de 2001.

RAMÍREZ KEIDY, Robinsón. Propuesta de manejo y almacenamiento de lubricantes nuevos y usados en las centrales generadoras de energía de EMGESA

S.A. E.S.P. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.
Ubicación - Referencia Universidad de la Salle sede centro. 24 de Abril de 2001.

SEINFELD, E. Contaminación Atmosférica, Ed. McGraw-Hill, (1978).

UPME. Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión, 2001.

XAVIER, Elias. La incineración de residuos sólidos, inertes y peligrosos, , Medellín, Julio de 2002

INTERNET

- <http://www.airliquide.com>
- <http://www.alfinal.com/petroleo/consideraciones.shtml>
- http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts2.html
- http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts5.html
- http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts24.html
- http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts22.html
- http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts60.html
- http://www.ambientum.com/enciclopedia/energia/4.01.11.06_1r.html
- <http://www.bq.uam.es/Clases/Medicina/Biofisica/guionbiofisica.html>
- <http://www.brujula.net/wiki/Lignito.html>
- <http://www.cadenaglobal.com/mastercanales.asp?pgm=palabra&id=485>
- <http://www.cambioclimaticoglobal.com/metano.html>
- <http://www.cator-sa.com/1present/empresa/empresa.htm>
- <http://www.cator-sa.com/1present/tecnologia/planta.htm>
- <http://www.cator-sa.com/3product/product.htm>

- <http://www.cecodes.org.co/asociados/cboyaca.htm>
- <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/fulltext/ecuador/anexo3.pdf>
- http://www.chevrontexacoursa.com/Spanish/glossary_p.html
- <http://www.ciencia-ficcion.com/glosario/m/metano.htm>
- http://www.cipma.cl/RAD/PDFs/RAd%2017_1/Katz_petcoke_II.pdf
- <http://www.cipres.cec.uchile.cl/~mpereira/frame5.htm>
- <http://www.cnice.mecd.es/recursos/bachillerato/tecnologia/manual/energia/norenov.htm>
- http://www.codelco.com/cu_zonacobre/salud.asp
- <http://www.deres.org.uy/index.php?id=25&type=0>
- http://www.ecoportel.net/contenido/temas_especiales/contaminacion/metales_pesados_ambiente_y_salud
- http://www.ecopetrol.com.co/paginas.asp?pub_id=36291&cat_id=962&idCategoriapincipal=2&cat_tit=Fuel%20Oil
- http://www.ecopetrol.com.co/Ingles/publicaciones.asp?cat_id=965&idCategoriapincipal=2&cat_tit=Butano
- http://www.ecopetrol.com.co/especiales/catalogo/f_combustoleo.htm+combusti%C3%B3n+de+combust%C3%B3leo&hl=es&lr=lang_es
- <http://www.el-mundo.es/salud/2000/384/00706.html>
- <http://www.estrucplan.com.ar/contenidos/geologia/DiccionarioGeologico/021Entrada.asp>
- http://www.es.encarta.msn.com/encyclopedia_761564924/Antracita.html
- <http://www.es.wikipedia.org/wiki/Etano>
- http://www.europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=es&type_doc=Directive&an_doc=1975&nu_doc=439
- http://www.europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=es&type_doc=Directive&an_doc=1987&nu_doc=101
- http://www.europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=es&type_doc=Directive&an_doc=1991&nu_doc=692

- http://www.europa.eu.int/institutions/comm/index_es.htm
- Directiva 87/101/CEE de la Comisión Europea
- <http://www.europa.eu.int/scadplus/leg/es/lvb/l21206.htm>
- <http://www.farn.org.ar/docs/mineria.rtf>
- <http://www.farn.org.ar/docs/p04/publicaciones4-5.html>
- <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/bioenergetica/>
- <http://www.funam.org.ar/alg.htm>
- <http://www.geocities.com/termotecnia2003/APLICACIONES.htm>
- <http://www.giresol.semarnat.gob.mx/index.php?option=content&task=category&id=9&id=78&Itemid=52>
- <http://www.h-c.es/domestico/gaspropano.htm>
- <http://www.h-c.es/domestico/gasbutano.htm>
- <http://www.ice.d5.ub.es/conferencias/htm/AAPEC.doc>
- <http://www.igme.es/internet/RecursosMinerales/metano/genesis.htm>
- <http://www.igme.es/internet/RecursosMinerales/panoramaminero/historico/94-95/CARB%D3N.pdf>
- <http://www.iie.org.mx/publica/bolmj98/aplimj98.htm>
- http://www.infra.com.mx/docs_pdf/hdot_butano.pdf
- <http://www.kroger.com/Es-Supp/Copper.htm>
- http://www.labor.state.ny.us/business_ny/employer_responsibilities/safety/s14.htm
- <http://www.lennotech.com/espanol/FAQ-contaminantes-del-agua.htm>
- http://www.lfp.uba.ar/Julio_Gratton/termo/08.Equilibrio.pdf
- <http://www.listin.com.do/antes/septiembre04/180904/cuerpos/republica/zona.htm>
- http://www.madrid.org/comun/0,,122007487_0_122030607,00html
- http://www.madrid.org/comun/ticas_MedioAmbiente/0,3787,122007487_128937640_122030681_12169704_0,00.html
- http://www.mct.gov.br/clima/espan/comunic_old/alcohol3.htm
- <http://www.monografias.com/trabajos14.shtml>

- <http://www.monografias.com/trabajos16/reciclaje-residuos/reciclaje-residuos.shtml>
- <http://www.montes.upm.es/Dptos/DptoSilvopascicultura/Edafologia/guia/Fichas/antracita.html> - 10k
- http://www.muieresdeempresa.com/linea_natural/fitness_salud/salud021101.shtml
- <http://www.mtas.es/insht/ipcsnspn/nspn0319.htm>
- <http://www.niehs.nih.gov/external/faq/alpha.htm>
- http://www.nodo50.org/termicasno/modules.php?name=Downloads&d_op=getit&lid=84
- <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea16s/ch20.htm>
- http://www.omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/119/htm/sec_11.htm
- http://www.omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/139/htm/sec_9.htm
- http://www.omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/05/htm/sec_8.html
- <http://www.ondasalud.com/edicion/noticia/0,2458,32953,00.html>
- <http://www.pagina12.com.ar/2000/00-07/00-07-24/pag14.htm>
- <http://www.panoramaenergetico.com/default.htm>
- <http://www.pdv.com/lexico/museo/minerales/carbon.htm>
- <http://www.platea.pntic.mec.es/~cmarti3/2000/sesion/eema/tabla3.htm>
- http://www.pulevasalud.com/subcategoria.jhtml?ID_CATEGORIA=103277&RUTA=1-5-7-1073-103277&ABRIR_SECCION=5
- <http://www.registrodeactividades.com/empresas/datos/1641.html>
- http://www.saludpr.com/sobrecarga_de_hierro_y_radicales_libres.htm
- <http://www.salud.tiscali.es/informacion/10261/niquel.html>
- <http://www.scielo.cl/pdf/historia/v37n1/art05.pdf>
- <http://www.smandes.org/recycle/metalesp.shtml>

- <http://www.state.nj.us/health/eoh/odisweb/>
- <http://www.tecnociencia.es/mediawiki/index.php/Etano>
- <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/YM9.html>
- <http://www.ucm.es/BUCM/be/legis/doce/es/main/dat/2001/ce180/ce18020010626es00150030.pdf>
- <http://www.udlap.mx/gente/jwelti/cursos/doc7.ppt>
- <http://www.ugts.usb.ve/ugtsusb/termodinamica%20informacion%20y%20vida.htm>
- <http://www.uma.es/Investigadores/Grupos/GRP96.htm>
- http://www.umm.edu/esp_ency/article/002836.htm
- <http://www.upme.gov.co>
- <http://www.upr.clu.edu/~inieves/macrotema/termodinamica.htm>
- <http://www.100cia.com/enciclopedia/Metano>
- <http://www.132.248.56.130/qo1/MO-CAP2.htm>